

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MILANO BICOCCA
FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI
Corso di Laurea in Scienze Ambientali

**Analisi dei fenomeni franosi di crollo e del danneggiamento agli edifici
indotti dalla sequenza sismica dell'Umbria - Marche
(settembre - ottobre 1997)**

Relatore: Prof. Angelo Cavallin

Correlatori: Dott.ssa Lucia Luzi
Dott. Mattia De amicis
Dott. Fabrizio Meroni

Tesi di Laurea di
Simone Marzorati
Matr. n° 502993

Anno Accademico 1999 / 2000

INDICE

CAPITOLO I: Inquadramento geologico e geomorfologico dell'area di studio	1
1.1 Localizzazione geografica dell'area	2
1.2 Evoluzione tettonico - sedimentaria	2
1.3 Descrizione geomorfologica	6
CAPITOLO II: L'evento sismico	9
2.1 Descrizione della sequenza sismica del settembre - -ottobre 1997	10
2.2 Struttura sismotettonica dell'Appennino Umbro - Marchigiano	11
2.3 Individuazione dei siti delle sorgenti sismiche	13
2.4 Fratturazione superficiale a seguito del terremoto	14
2.5 Effetti di superficie e danneggiamenti indotti dal terremoto del 1997	15
2.5.1 Fenomeni di fratturazione	15
2.5.2 Fenomeni franosi	16
2.5.3 Fenomeni di costipamento	16
2.5.4 Fenomeni idrologici	17
2.5.5 Danneggiamenti ad edifici, strade e infrastrutture	17
2.6 I terremoti storici nell'Umbria sud - orientale	18
CAPITOLO III: I Sistemi Informativi Territoriali (SIT)	23
3.1 Definizione, potenzialità e componenti dei SIT	24
3.2 Georeferenziazione: proiezioni e sistemi di riferimento	26
3.2.1 I sistemi di riferimento	26
3.2.2 Le proiezioni cartografiche	27
3.2.2.1 La proiezione trasversale di Mercatore	28
3.3 Costruzione di un SIT	29
3.3.1 Modelli della realtà	29
3.3.1.1 Il modello vettoriale	30
3.3.1.2 Il modello raster	31
3.4 L'organizzazione dei dati: i data base	33
3.4.1 Il modello relazionale	34
3.4.2 Il modello a oggetti	35
3.5 Applicazione dei SIT agli studi di pericolosità	36
3.5.1 Inventario di frane	36
3.5.2 Analisi euristica	37
3.5.3 Analisi statistica	37
3.5.4 Analisi deterministica	38

CAPITOLO IV: Raccolta dati	39
4.1 Dati a disposizione	40
4.2 Identificazione degli effetti di superficie	40
4.2.1 Individuazione delle frane	41
4.2.2 Individuazione dei danni agli edifici	42
4.2.3 Difficoltà incontrate nella fotointerpretazione	43
4.3 Il modello digitale del terreno	44
4.3.1 Trasferimento delle curve di livello da supporto cartaceo a informatico	44
4.3.2 Dalla georeferenziazione alla quotatura	44
4.4 Digitalizzazione delle mappe	47
4.4.1 La mappa geologica	47
4.4.2 La mappa delle frane	49
4.4.3 La mappa dei danni agli edifici	50
CAPITOLO V: Frane indotte dal terremoto	52
5.1 Ricorrenza dei tipi di frane durante un evento sismico	53
5.1.1 Classificazione delle frane indotte dal terremoto	53
5.1.2 Frequenza delle frane in terremoti storici	57
5.2 Modelli numerici per le frane indotte da un terremoto	58
5.2.1 Meccanica della stabilità dei versanti	58
5.2.2 Analisi di Newmark	60
5.2.3 Relazione tra violenza dello scuotimento e la Stabilità dei versanti	62
5.3 I crolli	66
5.3.1 Descrizione dei crolli	66
5.3.2 Un esempio di crolli indotti da un sisma: il terremoto del Friuli del 1976	69
5.4 Le frane indotte dal terremoto del 1997 nella Val Nerina.	70
CAPITOLO VI: Scelta della legge di attenuazione	73
6.1 Parametri sismici	74
6.1.1 Intensità di un terremoto	74
6.1.2 Magnitudo di un terremoto	75
6.1.3 Parametri di movimento del terreno	76
6.2 Leggi di attenuazione	77
6.2.1 Magnitudo e distanza	77
6.2.2 Sviluppo delle leggi di attenuazione	78
6.2.3 Legge di Sabetta e Pugliese (1996)	79
6.2.4 Legge di Spudich ed altri (1999)	80
6.2.5 Legge di Boore (1993)	81
6.2.6 Legge di Joyner e Boore (1988)	82
6.2.7 Legge di Campbell e Bozorgnia (1994)	83

6.2.8 Ricerca della legge più adatta	83
6.3 Mappe delle leggi di attenuazione	86
CAPITOLO VII: Produzione di una mappa di suscettibilità alle frane di crollo	88
7.1 L'applicazione	89
7.2 Mappa delle pendenze	89
7.3 Suddivisione della mappa geologica	90
7.4 Analisi statistica	91
7.4.1 Ricerca delle correlazioni	92
7.5 Produzione della mappa di suscettibilità alle frane di crollo	94
7.5.1 Determinazione di una legge per la suscettibilità (2 variabili)	94
7.5.2 Mappa della suscettibilità alle frane di crollo	98
7.5.3 Inserimento della geologia nella legge di suscettibilità	99
7.6 Conclusioni	100
CAPITOLO VIII: Valutazione del danneggiamento agli edifici	102
8.1 Introduzione	103
8.2 Descrizione dei dati ISTAT	103
8.3 Valutazione della vulnerabilità	104
8.4 Descrizione dell'area di studio	108
8.5 Mappe del danneggiamento agli edifici	109
8.6 Individuazione di possibili zone di amplificazione	112
8.7 Conclusioni	114
APPENDICE A: Softwares utilizzati nello studio	116
A.1 Arc/Info v.7.2.2	117
A.2 Ilwis v.2.2	118
APPENDICE B: Digitalizzazione e creazione di un DEM a partire dalla CTR alla scala 1:10,000	125
B.1 Digitalizzazione di una carta di curve di livello	126
B.1.1 Georeferenziazione della carta	126
B.1.2 Vettorializzazione della carta	126
B.1.3 Preparazione della cover per la quotatura	127
B.1.4 Quotatura delle curve di livello	128
B.1.5 Correzione dei limiti delle carte	128
B.1.6 Esportazione dei files da Arc/Info a Ilwis	129
B.1.7 Check dei segmenti	129
B.1.8 Unione delle mappe	130

B.2	Creazione del DEM in Arc/Info	130
B.3	Digitalizzazione della carta geologica	131
B.3.1	Utilizzo della tavoletta digitalizzatrice	131
B.3.2	Poligonizzazione della mappa geologica	133
B.3.3	Unione delle mappe geologiche	133
B.4	Digitalizzazione delle frane	135
B.4.1	Poligonizzazione delle frane	135
APPENDICE C: Elaborazione dati		136
C.1	Mappe dei parametri sismici	137
C.2	Sovrapposizione e incrocio di due mappe	138
C.3	Calcolo della densità relativa delle frane rispetto ad un parametro	139
C.4	Calcolo dei coefficienti della legge di suscettibilità alle Frane	140
APPENDICE D: Visualizzazione delle mappe		142
D.1	Visualizzazione delle mappe in Arc/Info	143
D.1.1	Visualizzazione in Arcedit	143
D.1.2	Visualizzazione in Arcplot	144
D.1.3	Visualizzazione in Grid	144
D.2	Visualizzazione delle mappe in Ilwis	144
APPENDICE E: Analisi dei danni agli edifici		146
E.1	Calcolo del danno agli edifici	147
E.2	Determinazione della vulnerabilità	149
E.3	Confronto dei valori di amplificazione	152
APPENDICE F: Scala macrosismica Mercalli - Cancani - Sieberg (MCS - 1930)		154
APPENDICE G: Scala dei Giudizi Sintetici di Danno (GSD)		158
APPENDICE H: Grafici relativi ai capitoli VI e VII		160
H.1	Grafici delle leggi di attenuazione	161
H.2	Grafici delle correlazioni tra mappe parametriche e frane di crollo	166
APPENDICE I: Grafici relativi al capitolo VIII		181
I.1	Edifici in buono stato di manutenzione	182
I.2	Edifici in cattivo stato di manutenzione	193

Bibliografia	204
Ringraziamenti	208

Ai Miei Genitori



Pen and brown ink drawing, Domenico Campagnola.

*Di queste case
non è rimasto
che qualche
brandello di muro
di tanti
che mi corrispondevano
non è rimasto
neppure tanto
ma nel cuore
nessuna croce manca
è il mio cuore
il paese più straziato*

G. Ungaretti

CAPITOLO I

Inquadramento geologico e geomorfologico dell'area di studio

1.1 Localizzazione geografica dell'area.

L'area di studio si colloca nella parte sud-orientale della Regione Umbria, al confine con le Marche. È situata in una zona prevalentemente montuosa, nell'alto bacino del Tevere, in cui non sono presenti centri abitati di notevoli dimensioni. I maggiori comuni limitrofi all'area sono Foligno e Spoleto, mentre i comuni di maggior interesse all'interno dell'area sono rappresentati da Sellano e Cerreto di Spoleto. Il resto dei centri abitati è composto da una serie di paesi minori più o meno isolati, raggiungibili attraverso strade secondarie.

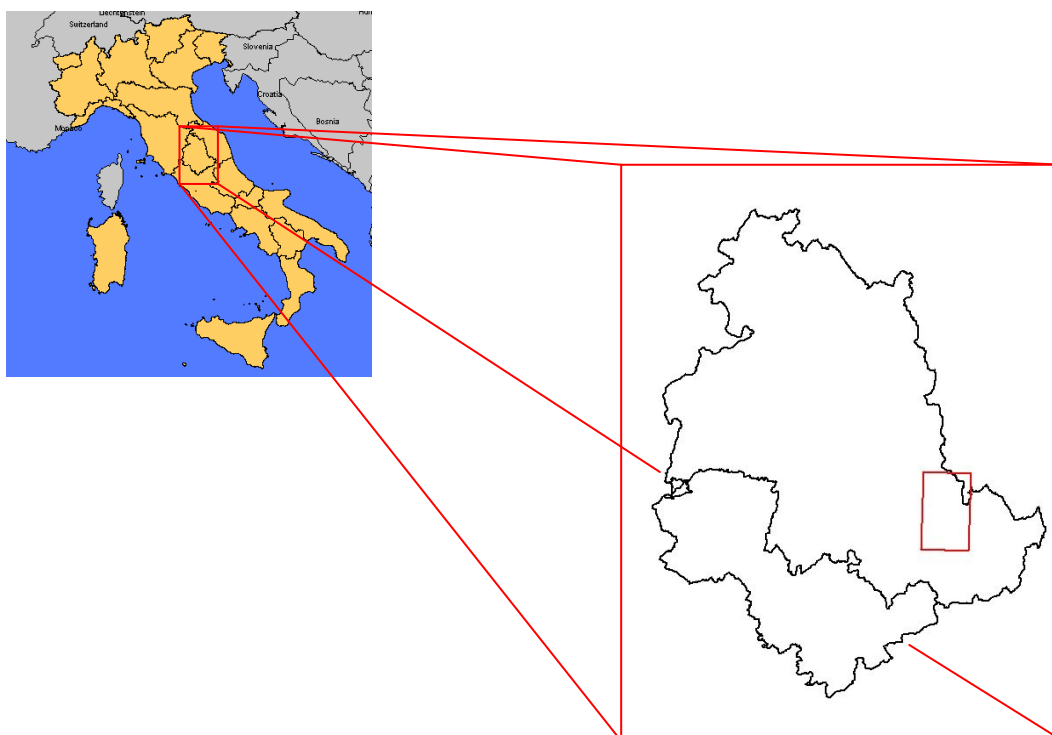


Fig.1.1 Area di studio nell'Umbria sud orientale.

1.2 Evoluzione tettonico-sedimentaria.

Nell'area di studio si riscontra la successione sedimentaria umbro-marchigiana, che descrive la storia geologica della regione a partire da circa 220 milioni di anni fa circa: questa è anche l'età delle rocce affioranti più antiche rinvenute.

La successione fu deposta sul margine della crosta continentale africana a partire dal Trias medio-superiore (Centamore, Deiana, Calamita, Micarelli, 1986) . A quel tempo, il supercontinente Pangea comprendeva un golfo (mare della Tetide) che si estendeva a est e si chiudeva a ovest nell'attuale area del Mediterraneo. Alla fine del Permiano la Pangea si frazionò, disarticolandosi in zolle minori, tra cui la “microplacca Adria”, area di interesse dello studio (Passeri, 1994).

Nel Trias superiore l'area umbro-marchigiana era occupata da un bacino evaporitico di acqua bassa, al margine interno di una piattaforma carbonatica: in tale ambiente si depositarono le Anidriti di Burano. Questo periodo fu seguito da un innalzamento del livello del mare che permise la deposizione, in piattaforma carbonatica, del Calcare Massiccio, fino al Lias inferiore.

Nel Lias medio, si instaurò un'intensa fase tettonica a regime distensivo, dovuta alla successiva apertura del mare Ligure-piemontese; questo porta all'annegamento della piattaforma carbonatica, che non avviene omogeneamente ma porta alla formazione di aree rialzate ed altre ribassate (Centamore, Deiana, Calamita, Micarelli, 1986). Le prime raccolgono sedimentazioni condensate e lacunose (formazione del Bugarone), mentre le seconde presentano formazioni più potenti e complete (Corniola, Rosso Ammonitico e Marne del M.te Serrone, Calcarei Diaspri).

Arrivando al Cretaceo si ha l'apertura dell'oceano Atlantico, causa dell'inversione del movimento della placca africana rispetto quella europea con conseguente chiusura della Tetide occidentale. Ciò portò alle prime fasi orogeniche alpine con la chiusura e scomparsa del mare Ligure-piemontese; tali fasi si conclusero nell'Eocene, con la collisione continentale. In questo periodo l'area umbro-marchigiana rimase in condizioni pelagiche, accompagnate dalla deposizione della Maiolica, delle Marne a Furoidi e della Scaglia (Passeri, 1990).

A partire dall'Oligocene, iniziò l'orogenesi della catena appenninica, con un fronte deformativo migrante verso est e la formazione di un sistema catena-avanzata che raggiunge l'area umbro-marchigiana nel Miocene inferiore, quando avviene la sedimentazione torbida, rappresentata dalla formazione del Bisciaro. In seguito nell'area umbra si deposita la Marnoso Arenacea, mentre nell'area marchigiana si deposita lo Schlier e le Marne con Cerrognola. La deformazione tettonica si protrae fino a far emergere l'area nel Miocene superiore. La crisi di salinità del Messiniano lasciò tracce soprattutto nell'area marchigiana ancora soggetta a sedimentazione marina (Passeri, 1990).

La parte umbra fu sottoposta a tettonica distensiva durante il Pliocene, con la formazione di profonde depressioni, ospitanti ingenti bacini continentali (il maggiore fu il bacino Tiberino).

In seguito continuò il progressivo ritiro del mare, definitivo nel Pleistocene inferiore. La sedimentazione pleistocenica è dovuta soprattutto a pianure alluvionali e deltizie, ad ambienti lacustri e palustri in bacini endoreici.

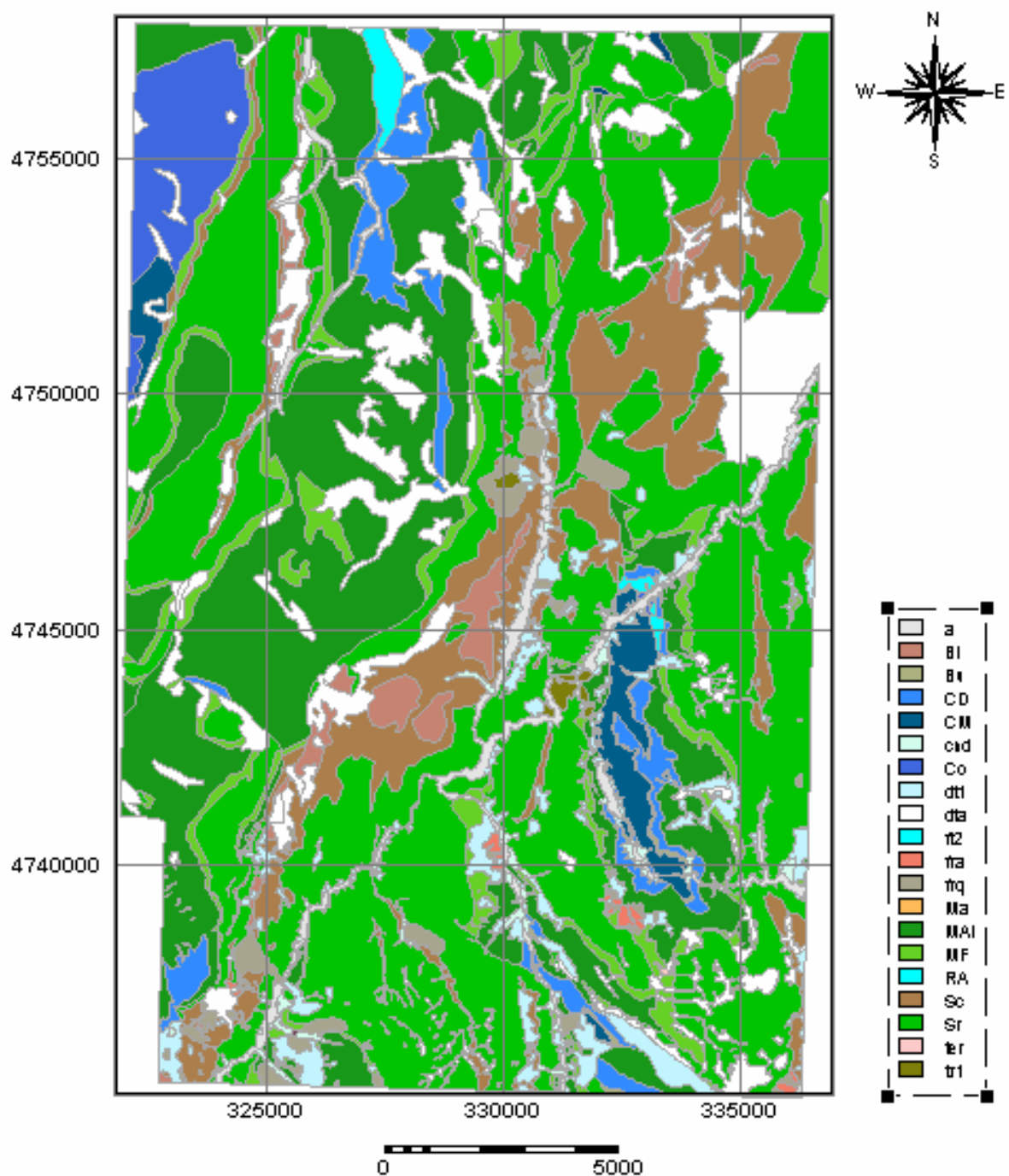




Fig.1.2 Mappa geologica dell'area di studio.


Di seguito viene presentata la descrizione delle formazioni della successione umbro-marchigiana che hanno interessato l'area di studio.


■ -Corniola (Lotharingiano-Pliensbachiano) (Co): calcari micritici biancastri e beige con liste e noduli di selce bruna o nerastra e con intercalazioni argilloso-marnose grigio-verdastre. La stratificazione è piuttosto netta e gli strati hanno spessore variabile, ma in


genere non superano i 40-50 cm.


 **-Rosso Ammonitico,(Ra)** successione di calcari, calcari marnosi e marne nodulari in strati con spessore variabile tra 40 e 70 cm per i calcari e 10-13 cm per le marne


 **-Calcari diasprini umbro-marchigiani** (Calloviano-Titonico inf.) **(CD)**: calcari con liste e noduli di selce, calcari selciferi d'aspetto granulare e selce; la stratificazione è in genere piuttosto netta e in strati sottili (4-10 cm).


 **-Calcere massiccio del M. Nerone** (Retico-Sinemuriano sup.) **(CM)**: potente sequenza ciclotemica che raggiunge i 400-450 m di spessore caratterizzata da una stratificazione grossolana con strati di spessore assai variabile (da 50 cm a 10-15 m); i litotipi fondamentali sono costituiti da intraspatiti fossilifere, biospatiti e oospatiti.


 **-Formazione del Bugarone** (Pliensbachiano-Titonico inf.) **(Bu)**: costituita quasi esclusivamente da calcari e calcari marnosi nodulari, a luoghi con intercalazioni marnose.


 **-Maiolica** (Titonico sup.-Aptiano inf.) **(MAI)**: calcari micritici biancastri, con selce scura in liste e noduli; a luoghi si rinvencono intercalazioni di marne argillose nerastre, strati dolomitici e calcari nodulari; la stratificazione è in genere piuttosto netta e gli strati hanno uno spessore medio di 30-40 cm.


 **-Marne a Furoidi** (Aptiano inf.-Cenomaniano inf.) **(MF)**: il membro inferiore è costituito da marne e marne argillose policrome con stratificazione netta e sottile. Il membro superiore è costituito da marne calcaree e calcari marnosi in strati di 10-25 cm.

 **-Scaglia cinerea** (Eocene sup. Oligocene) **(Sc)**: marne calcaree, marne, marne argillose e, subordinatamente calcari marnosi micritici in strati sottili e medi.

 **-Scaglia rosata** (Turoniano sup.-Eocene medio) **(Sr)**: strati calcarei e calcareo-marnosi ben definiti, con frattura concoide o scagliosa, associati a strati marnoso-calcarei; sono presenti inoltre intercalazioni calcarenitiche talora grossolane; nella parte inferiore e nella estrema porzione sommitale prevale la componente calcarea associata a selce rossa; gli strati hanno spessore variabile tra i 15 ed i 60-70 cm.

 **-Depositi fluvio lacustri o lacustri (fl2)**: lembi sparsi ed isolati di depositi prevalentemente ciottolosi a granulometria variabile, talora cementati.


 **-Detriti antichi e brecce cementate (dt1)**: materiali detritici in genere relativamente potenti e cementati, spesso con stratificazione ben evidente, che rappresentano il prodotto di processi di gelifrazione e ruscellamento durante fasi climatiche fredde di tipo interglaciale.

 **-Travertini (tr1)**: lembi di placche travertinose limitate lungo corsi di acqua.


 **-Terre rosse (ter).**

 **-Conoidi (cnd).**

 -Detriti di falda recenti (dta).

 -Frane quiescenti (frq).

 -Frane attive (fra).

 -Alluvioni attuali e recenti (a): depositi ciottolosi a granulometria talvolta grossolana, che costituiscono il letto di inondazione attuale.

1.3 Descrizione geomorfologica.

La morfologia presente nell'area di studio è caratterizzata, in una visione generale, dalla Dorsale Umbro-Marchigiana, la quale si estende da N-O a S-E con una incurvatura verso oriente. L'evoluzione del rilievo in questa zona cominciò durante il Miocene inferiore, quando si delinearono le prime pieghe ancora in fase sottomarina; tale serie di deformazioni si muoveva da S-O a N-E, finché non emerse nel Miocene superiore come dorsali insulari subparallele. Man mano che l'emersione procedeva, si modellava un ambiente con forme debolmente ondulate e versanti poco acclivi, mentre l'erosione fluviale compensava il sollevamento e drenava verso oriente. Tali forme non mutarono fino al momento in cui si instaurò una tettonica distensiva nella parte occidentale, con la conseguente formazione di strutture ad horst e graben. In questo modo le aree depresse dei graben operarono la cattura dei fiumi, generando uno spartiacque immediatamente ad est della zona distensiva; si formarono dei laghi intermontani, i quali defluivano verso ovest a causa della flessura dovuta all'evolversi del sistema nel senso opposto. Il disegno finale è costituito da tratti fluviali paralleli agli assi strutturali nelle conche intermontane, collegate da tratte spesso profondamente incise nelle strutture. Così si è formato il reticolo idrografico del bacino del Tevere, inizialmente costituito dal così detto "Lago tiberino" che si estendeva su gran parte dell'Umbria attuale, con massima estensione nel Pleistocene inferiore; tale lago non è esistito veramente in quanto era smembrato in unità indipendenti tra loro, le quali hanno cominciato a svuotarsi causa il sollevamento del territorio; le ultime paludi si sono vuotate in epoca storica (il lago di Assisi era ancora molto esteso all'età dei Romani). La tettonica compressiva raggiunse la sua maggiore attività nel Pliocene inferiore-medio e contemporaneamente si determinò l'attuale posizione dello spartiacque tra Tirreno e Adriatico. I rilievi che si formarono vennero parzialmente spianati dall'azione erosiva e il risultato fu un paesaggio dalle forme più dolci delle attuali, la cui testimonianza si può dedurre dai lembi di superfici subpianeggianti o poco ondulate in posizione sommitale. Il paesaggio suddetto è stato dislocato e posto a quote differenti per la tettonica distensiva e il

sollevamento successivi. Infatti nel Pleistocene inferiore si verificò un brusco sollevamento di alcune centinaia di metri, con conseguente approfondimento delle valli fluviali, per l'energia acquisita dalle acque correnti. La fase distensiva recente ha prodotto effetti minori rispetto a quella compressiva, ma in alcuni casi ha lasciato grandi evidenze come i bacini neotettonici endoreici dei piani di Castelluccio, Colfiorito e Montelago, precedentemente interpretati come forme carsiche. Il sollevamento generale ha portato anche all'attivazione di deformazioni gravitative profonde, intaccanti anche le formazioni rocciose più resistenti, quali le calcaree (Bisci et al., 1990).

Ciò che risulta oggi dalle deformazioni passate è una successione di dorsali che sono conformi alla struttura, cioè seguono approssimativamente l'andamento delle anticlinali. Infatti il loro nucleo è sostanzialmente composto da rocce calcaree del mesozoico, più resistenti dei termini marnosi che le bordano. Le rocce calcaree sono quelle che raggiungono le quote maggiori e producono morfologie aspre e pendii acclivi, grazie alla loro notevole stabilità e resistenza all'erosione; le parti sommitali possono essere spesso di debole pendenze per le condizioni ereditate dai modellamenti passati. I corsi d'acqua che vi scorrono incidono solo debolmente il substrato, dando vita a valli strette e poco incise; infatti anche i fiumi maggiori non hanno mai generato valli estese lateralmente ma piuttosto hanno creato delle vere e proprie gole. A causa dell'attività tettonica e della dissoluzione chimica, le rocce calcaree presentano abbondanti fenomeni carsici, soprattutto per quel che riguarda le formazioni del Calcare Massiccio e della Corniola; nelle pareti esposte della prima possono essere osservate ampie cavità ed archi naturali (Bisci, Dramis, 19xx). I fenomeni più evidenti si possono ritrovare nelle piane tettoniche di Colfiorito e Castelluccio, ove sono presenti inghiottitoi che drenano in profondità le acque. Fenomeni minori interessano invece la Maiolica e la Scaglia Rossa. Una caratteristica comune delle cavità carsiche della regione è data dallo sviluppo prevalente su più piani, indicanti livelli di falda precedenti (Cattuto, 1976; Coltorti, 1981a). Conseguenza del carsismo è la riduzione del drenaggio superficiale a favore di quello sotterraneo.

Le rocce calcaree caratterizzate da pareti molto acclivi portano all'accumulo di detriti di versante, composti da frammenti a spigoli vivi, di piccole dimensioni, disposti in strati di spessore variabile. Inoltre vanno ricordati i conoidi di detrito, diffusi alle basi dei fossi in versanti ripidi (Bisci, Dramis, 19xx).

Come già accennato, si ha un passaggio dalle litologie calcaree a quelle marnose, con un contenuto via via crescente di argilla nei sedimenti. Queste portano a pendenze meno acclivi, a valli fluviali più larghe e a versanti più articolati. Inoltre non instaurandosi

fenomeni carsici, il drenaggio superficiale ha una maggiore densità. La litologia varia fino a formazioni quali la Marnoso Arenacea e terreni prevalentemente pelitici, quindi argillosi, ma questi non si ritrovano nell'area di interesse.

La Dorsale Umbro-Marchigiana funge da spartiacque tra i fiumi che drenano in Adriatico e quelli che drenano nel Tirreno. Nell'area di studio i rilievi più pronunciati sono rappresentati dal M.te Maggiore, dal M.te Maggio e dal M.te Cavogna, i quali raggiungono quote intorno ai 1400 m s.l.m.; insieme al M.te Santo, al M.te Galloro, al M.te Tito e al M.te Civitella, di più modeste altitudini, costituiscono la porzione dell'area solcata dal fiume Nera che scorre nella Val Nerina, unico fiume che sorge nelle Marche per poi ripiegare verso ovest e andare a immettersi nel Tevere. La Val Nerina presenta le acclività tipiche di alcune valli di questi posti, contenenti varie gole strette, sormontate da scarpate subverticali; a tale proposito si può menzionare la Balza Tagliata, forra nei pressi di Triponzo. Gli altri fiumi che scorrono nella zona sono il fiume Corno, il fosso Tissino e il torrente Vigi, affluenti del Nera; infine il torrente Menotre che scorre inizialmente longitudinale alla dorsale per poi curvare e immettersi nella piana di Foligno, dove si getta nel fiume Topino.

CAPITOLO II

L'EVENTO SISMICO

2.1 Descrizione della sequenza sismica del settembre-ottobre 1997.

Il giorno 4 settembre 1997 ha inizio un aumento dell'attività sismica nell'Appennino Umbro-Marchigiano, con una scossa di magnitudo locale $M_L=4.4$, con epicentro nella zona di Colfiorito. Essa è stata seguita da circa 150 repliche di magnitudo inferiore, soprattutto nella prima decade del mese, e da alcuni giorni di quiescenza per poi culminare con la prima forte scossa il giorno 26 settembre alle 2.33 dell'ora locale, nella zona epicentrale di Cesi-Colfiorito, di magnitudo $M_L=5.5$. A poche ore di distanza, alle 11.40, si è verificata la scossa principale dell'intera sequenza, avente $M_L=5.8$, la quale ha prodotto danni fino al IX grado della scala Mercalli (MCS). Nelle settimane successive l'incremento del numero delle scosse è stato costante, arrivando fino a 70 scosse al giorno di magnitudo maggiore di 2. Dal giorno 12 ottobre, l'attività si è spostata più a Sud, andando ad interessare i dintorni di Sellano e Preci. Proprio nei pressi di Sellano si è verificata la terza delle scosse più intense, di $M_L=5.4$, il 14 ottobre alle 17.23; il paese, risparmiato in parte dalle precedenti scosse, ha subito danni dell'VIII-IX grado della MCS (Decanini, Sabetta, 1998).

I primi studi eseguiti attraverso l'analisi dei dati provenienti dalle stazioni accelerometriche, hanno indicato che il terremoto è stato causato dal movimento lungo faglie a direzione appenninica. Le repliche della sequenza di settembre-ottobre hanno compreso un ampio settore con direzione NW-SE, lungo circa 35 km e largo 10-15 km. Esso supera le dimensioni delle faglie che si sono attivate singolarmente; ciò porta a supporre che la struttura interessata sia composta da almeno tre frammenti di faglia adiacenti, lunghi ciascuno dai 5 ai 10 km (Amato et al., 1998). Dalle localizzazioni epicentrali, dalla distribuzione delle repliche e dei danni osservati, da considerazioni preliminari dei dati accelerometrici, si estrae che le due rotture principali, innescanti le scosse di Colfiorito, si sono propagate rispettivamente verso SE e verso NW; mentre l'attività dal 3 al 12 ottobre ha coinvolto tutta la struttura sismogenetica da Sellano a Nocera Umbra, arrivando nella parte più meridionale della stessa il 14 ottobre, in prossimità di Sellano, Preci e dell'alta Val Nerina.

Le profondità ipocentrali sono comprese quasi interamente entro i 10 km di profondità, con un progressivo approfondimento da NE a SW; ciò suggerisce un'immersione del piano di faglia di 35° , verso SW (Amato et al., 1998).

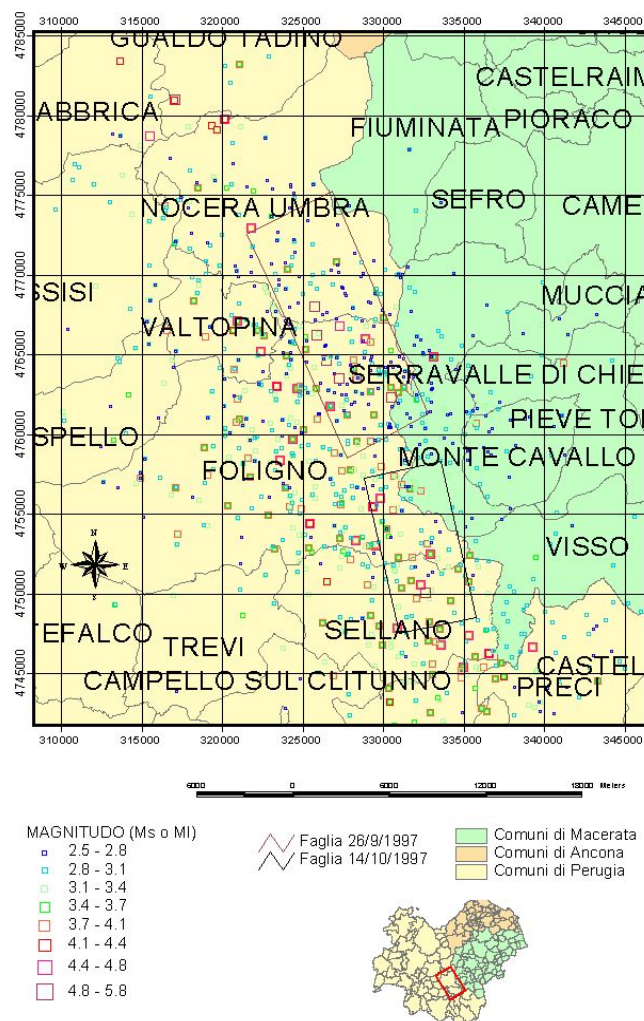


Fig2.1 Mappa degli epicentri della sequenza sismica del settembre – ottobre 1997.

2.2 Struttura sismotettonica dell'Appennino Umbro-Marchigiano.

La situazione strutturale presente nell'Appennino Umbro-Marchigiano è abbastanza complicata, per la presenza di numerosi sistemi di fagliazione che disarticolano la crosta terrestre disomogeneamente. Comunque si può schematizzare questo settore considerando le faglie principali, generalmente normali, con direzione NW-SE. Esse sono sovrainposte alla precedente catena a pieghe che presenta sovrascorrimenti di età neogenica. La loro attività è osservabile dalla dislocazione di depositi e di elementi morfologici di riferimento di età pleistocenica-olocenica.

Il regime tettonico prevalente attuale è quello estensionale, dovuto all'interposizione tra la fascia peritirrenica toско-laziale in distensione e la fascia padano-adriatica in compressione, interrotte da alcune zone di svincolo a cinematica trascorrente.

L'area epicentrale coinvolge la zona sismogenetica della Val Nerina , comprendendo anche

le strutture di Norcia e Cascia, oltre che quelle di Colfiorito a nord del fiume Nera. Queste strutture non sono continue longitudinalmente, anche se non sono ostacolate da rilevanti barriere trasversali e quindi si interconnettono fino all'area aquilana; ciò è documentato da alcune sequenze sismiche storiche, come quella del 1703, in cui l'attività si spostò da Cascia e Norcia fino all'aquilano. L'estensione delle strutture aumenta da nord a sud e perciò anche il loro potenziale.

Nell'area di Colfiorito, l'assetto morfostrutturale viene dominato da più depressioni tettoniche, dovute ai sistemi di faglie quaternarie riattivate nel Pleistocene. Le caratteristiche geometriche e cinematiche di quest'ultime possono essere riassunti come segue:

- direzione media delle faglie N140-N160, immergenti a WSW, con movimenti diretti;
- faglie con andamento N-S, subverticali, trascorrenti sinistre;
- faglie subverticali con direzione media N70-N90.

Questo sistema di faglie ha originato blocchi di crosta sollevati e depressioni tettoniche (come a Colfiorito, Norcia, Cascia), riempite di sedimenti lacustri, fluvio-lacustri e detritici, potenti anche 100 m. Lungo i versanti tettonici si osservano spesse scarpate di faglia fresche e che talora coinvolgono le coperture detritiche. Alla base dei pendii si trovano accumuli di frana, mentre nelle parti sommitali sono presenti trincee che indicano deformazioni gravitative profonde (Prestininzi, Romeo, Valentini, 1998).

Addentrando più nel dettaglio, per quel che riguarda le zone colpite dal terremoto, bisogna considerare i tre sistemi di faglie che controllano l'attività nella zona: il sistema di Piseni-Verchiano-Sellano, quello di Colfiorito-Cesi-Costa e quello di M. Pennino-M. Prefoglio. La deformazione del settore fragile della crosta terrestre è pertanto comandata da tali faglie ad alto angolo nei primi 5 km di profondità, queste spesso riutilizzano strutture più antiche giurassiche, cretache e mioceniche; tra i 5 e i 12 km di profondità, esse vengono a contatto con faglie basali a più basso angolo (faglia est Altotiberina e le rampe dei piani di sovrascorrimento. In particolare, le faglie normali di Piseni, Colfiorito e M. Prefoglio si diramerebbero verso la superficie a partire da un tratto più inclinato della faglia Altotiberina (Calamita, Coltorti et al., 1998).

2.3 Individuazione dei siti delle sorgenti sismiche.

Pochi giorni dopo il terremoto, erano già stati valutati i meccanismi focali relativi alle scosse principali (Boncio, Lavecchia, 1997), individuando chiaramente un regime distensivo, lungo piani con direzione NW-SE o con piani transtensivi sinistri N-S. Le deformazioni che sono state osservate in superficie, hanno spinto all'ipotesi che le cause del sisma siano da collocare nei sistemi di faglie normali che riguardano l'area di Colfiorito e Sellano. I piani sismici individuati sono ovest immergenti, il che concorda con la geometria del volume di repliche in profondità, la quale indica uno spostamento in profondità degli ipocentri da NE a SW.

Le scosse principali e le repliche sono contenute all'interno di una fascia che si protrae per circa 35 km con direzione NW-SE, da Nocera Umbra a Preci, attraverso Annifo, Colfiorito e Costa. Nelle fasi iniziali la sequenza sismica ha coinvolto la frazione settentrionale della fascia, nella zona tra Colfiorito e Costa (scosse del 26 settembre), per poi spostarsi verso SE oltre Nocera umbra, fino a raggiungere nella fase finale l'area tra Sellano e Preci.

Dai dati sismologici preliminari, si è dedotto che le profondità ipocentrali sono intorno ai 6 km, con un certo margine di incertezza soprattutto per le scosse del 26 settembre, svincolate dalle registrazioni delle stazioni mobili.

Dall'evoluzione spazio-temporale e dalle caratteristiche geometriche della sequenza sismica fra il 26 settembre e il 14 ottobre, si estrae l'informazione che sono avvenuti più episodi di rottura, i primi scatenanti i successivi, con un processo a catena. Per le scosse del 26 settembre, le quali sono molto vicine sia nel tempo che nello spazio, si è ipotizzato che la struttura sismogenetica fosse unica: il primo evento si è propagato verso SE, mentre il secondo verso NW, in direzione opposta. La faglia interessata sembrerebbe quella di M. Prefoglio e più in dettaglio la sua parte più profonda e meno inclinata. Questa deduzione è avvalorata anche dalle deformazioni osservate tramite misure GPS (Anzidei et al., 1997): i dati geodetici indicano uno spostamento della stazione di M. Pennino, posizionata al letto della faglia, di 10 cm verso NE; al contrario la stazione di Collecroce, al tetto della faglia, ha mostrato uno spostamento analogo ma in direzione SSW. È coerente posizionare la rottura lungo la parte più profonda della faglia, in quanto essa è una zona di accumulo di sforzi e quindi potenzialmente può innescare processi deformativi. Il campo di sforzi, perturbato dalle scosse del 26 settembre, probabilmente ha innescato l'attività di uno o più sistemi di faglie, immergenti a ovest, le quali sono andate ad interessare le zone di Costa, M. Tolagna e Preci, esprimendosi nelle scosse di metà ottobre nell'area di Sellano.

2.4 Fratturazione superficiale a seguito del terremoto.

Tra i vari rilevamenti di campagna effettuati successivamente al terremoto sono da considerare quelli rivolti all'individuazione di fratture superficiali e di fagliazioni connesse al terremoto (Galli et al., 1998). Di seguito vengono riassunte le osservazioni ottenute:

- struttura bordiera orientale del bacino di Colfiorito (faglie di M. le Scalette, M. Prefoglio, M. Faento, M. Capridosso): lungo il versante occidentale di M. le Scalette si sono osservati movimenti dell'ordine di 2 cm circa, con un fronte di rottura lungo 30-40 m, sulla scarpata di faglia di direzione N 125°-135°; sul M. Faento la copertura detritica ha subito un rigetto di 2-3 cm; lungo la strada da Dignano a Le Rote, in località La Pintura, si è trovato un sistema di fratture con direzione N 160°, le quali tagliano diagonalmente la strada asfaltata come quelle osservate nella strada sterrata nelle vicinanze (spostamento verticale da 1 a 3 cm); a valle della strada sterrata che da Costa sale verso il M. Tolagna, si è riscontrato un movimento verso il basso fino a 5 cm del detrito, lungo la scarpata di faglia sul versante NW del M. Tolagna; ad est dell'abitato di Costa il movimento di una faglia N 130° si è verificato nel detrito, dell'ordine mediamente di 6-9 cm, con una punta di 21 cm, mentre nessun movimento ha riguardato la strada asfaltata o la roccia.
- strutture meridionali dell'area: a monte dell'abitato di Rasenna, presso la cappella di S. Angelo, subito dopo il 14 ottobre, si sono create varie fratture con spostamento verticale sino a 10 cm, orientate N 135°-150°, per una lunghezza di circa 400 m; un chilometro a nord, all'altezza dei tornanti della strada l'asfalto presenta fratture di pochi cm; nell'area tra gli abitati di Renaro e Mevale, sono state causate fratture beanti, di lunghezza variabile tra i 10 e i 450 m, con rigetti dai 5 ai 20 cm; dove la frattura interseca la strada tra Piaggia e Renaro, il manto stradale è stato dislocato di circa 4 cm; tali fratture di direzione complessiva N 145° sono coerenti con quelle più meridionali presso Mevale.

Quindi, dalle osservazioni esposte sopra si sono evidenziate due situazioni differenti.

Nel settore settentrionale, lungo le strutture di Colfiorito (7km), M. Tolagna (2 km) e Cesi-S.Martino (6 km), le fratture sono state osservate in un'area lunga una quindicina di km ed ognuna raggiungeva al massimo le poche centinaia di m (400-500 m). inoltre solo in corrispondenza di versanti molto acclivi e in porzioni contenenti detriti non cementati; spesso il movimento è subparallelo alla direzione di massima pendenza e non sono stati osservati movimenti nei punti in cui le faglie dividevano rocce; l'evoluzione delle scarpate di faglia spesso appariva condizionata dai processi erosivi piuttosto che da quelli cosismici;

perciò gli effetti geologici osservati lungo le faglie di Colfiorito e Cesi-S.Martino non possono essere interpretati univocamente, in quanto non è da scartare la possibilità che l'effetto sia dovuto alla gravità invece che alla tettonica.

Nel settore meridionale la fratturazione non è influenzata da fattori morfologici o litologici, ma percorre indifferentemente vallette, crinali, depositi cementati e sciolti. Quindi non appare riconducibile a fenomeni di instabilità dei versanti. Nella zona di Renaro e Mevale le fratture sono subverticali. Per quel che si può avanzare a riguardo della connessione tra effetti e faglia sismogenetica, due sono le maggiori ipotesi:

- attivazione di strutture tettoniche secondarie rispetto alla faglia in cui è avvenuta la rottura;
- espressione diretta in superficie della faglia sismogenetica.

Le dimensioni della faglia possono essere calcolate dall'epicentro del 14 ottobre, dalla profondità ipocentrale (6-7 km) e dalla presunta espressione superficiale della faglia (le rotture si sono protratte per circa 5 km da NW a SE). Il piano di faglia risulta avere un'inclinazione media di 55° e un'estensione dai 5 agli 8 km. Le valutazioni preliminari di massima accresce la possibilità che la faglia abbia raggiunto effettivamente la superficie, così come desunto dalle rotture.

2.5 Effetti di superficie e danneggiamenti indotti dal terremoto del 1997.

Il terremoto dell'autunno del 1997 ha causato la comparsa di effetti di superficie primari, come fagliazioni superficiali, ma soprattutto secondari e non meno importanti, quali fenomeni franosi, fenomeni di costipamento e fenomeni idrologici. I danneggiamenti hanno riguardato soprattutto gli edifici dei centri abitati, ma non mancano i danni alle strade o più in generale alle infrastrutture.

2.5.1 Fenomeni di fratturazione.

Come espresso nel paragrafo precedente, i fenomeni di fratturazione sono stati numerosi, distribuiti su tutta l'area interessata dal terremoto. Essi hanno interessato coperture quaternarie, fasce colluviali, depositi fluvio-lacustri. Sistemi di fratture sono stati rilevati essenzialmente lungo i tracciati stradali asfaltati e in terra battuta. La tipologia delle fratture si compone di fratture beanti (da mm a dm) con rigetto verticale e delle ben più rare fratture con componenti di trascorrenza. La loro lunghezza raggiunge sporadicamente le centinaia di metri, mentre frequenti sono quelle da metriche a decametriche.

Tenendo conto delle aree in cui la fratturazione aveva una densità areale significativa (Fondi, Afrile, Piseni, S.Martino, Costa, Cesi), si è analizzata l'orientazione delle direzioni che sono risultate ricadere sostanzialmente nel campo di quelle delle principali strutture regionali (la massima densità dei fenomeni si è verificata nel campo N120°-150°, cioè in direzione NW-SE, come le principali faglie) (Esposito et al., 1998).

2.5.2 Fenomeni franosi.

I fenomeni franosi scatenati dal terremoto rientrano in tre diverse tipologie: crolli, di cui si parlerà più dettagliatamente nel presente studio, e scorrimenti traslazionali e rotazionali.

I crolli sono avvenuti essenzialmente in corpi rocciosi caratterizzati spesso da un elevato grado di fratturazione, originatisi da pareti ripide che spesso sovrastano le strade. Per quel che riguarda la zona di Colfiorito, gli unici fenomeni di crollo di una certa rilevanza sono stati a Stravignano Bagni e Sorifa, in entrambi i casi avvenuti in depositi di travertino. Nell'area di Sellano i crolli sono stati numerosi, come si descriverà nei capitoli successivi.

Gli scorrimenti hanno interessato quasi esclusivamente la zona di Colfiorito a seguito delle scosse del 26 settembre, localizzandosi su coperture e depositi quaternari, aventi modeste dimensioni ma comunque interessando porzioni del territorio interessate da attività antropiche (principalmente attività agricole) (Esposito et al., 1998).

2.5.3 Fenomeni di costipamento.

I fenomeni di costipamento osservati sono stati sporadici e di modesta entità. Essi si identificano in tre diverse località del comune di Nocera Umbra.

A Bagnara si è verificato il costipamento di un piazzale nel centro abitato, con abbassamento del piano di campagna di alcuni centimetri.

A Le Moline, vicino ad un piccolo ponte nei pressi delle abitazioni, il manto stradale è ceduto al contatto tra la strada e la struttura più rigida del ponte, a causa del costipamento del suolo.

Più complicato il fenomeno alla diga in terra di Acciano, che si è espresso con il cedimento della stradina di coronamento della diga. Qui si è verificata la concomitanza di fenomeni gravitativi dei versanti, i quali hanno spinto sui fianchi della diga, con il costipamento dei materiali di riempimento della diga stessa (Esposito et al., 1998).

2.5.4 Fenomeni idrologici.

Gli effetti idrologici indotti dal terremoto hanno riguardato variazioni di portata o di livello in sorgenti, pozzi e fiumi; alcune sorgenti si sono addirittura disseccate, mentre altre sono comparse, a volte come nuova via di fuga delle precedenti; non mancano i casi di intorbidamento delle acque.

I maggiori fenomeni si sono rilevati ad esempio alla sorgente del fiume Topino, vicino a Bagnara, in cui le acque si sono intorbidite a seguito della prima scossa del 26 settembre per poi scomparire dopo la seconda scossa per circa due ore (Esposito et al., 1998).

2.5.5 Danneggiamenti ad edifici, strade e infrastrutture.

Quello che più colpisce in un terremoto sono sicuramente i danni che subiscono le costruzioni antropiche, i quali generalmente mettono a repentaglio le vite umane.

I danni creati dal terremoto del 1997 sono stati numerosi e hanno colpito praticamente tutti gli abitati nelle zone circostanti agli epicentri. Fortunatamente, rispetto ai danni subiti dagli edifici, le vittime del terremoto sono state relativamente poche, grazie alle numerose scosse antecedenti alle principali, le quali hanno messo in allerta la popolazione che si è intimorita e ha lasciato le abitazioni prima degli eventi catastrofici.

La rete urbana presente nella zona colpita dal terremoto, si compone essenzialmente di centri abitati secondari, con un numero modesto di abitanti, a volte persino esiguo, trattandosi di paesini di montagna in cui ormai abitano solo persone per lo più anziane.

Indagini preliminari hanno permesso di osservare la diffusa presenza di case rurali in pietra che sono facilmente crollate, mentre altre case più moderne hanno spesso subito crepe nelle pareti o cedimenti dei tetti. Ma in altri casi l'età o il tipo di costruzioni non è stato determinante nel danneggiamento, visto che anche case più recenti sono crollate. Si può citare l'esempio di Cesi (Capotorti et al., 1998); il paese si compone di due frazioni: Cesi Bassa poggia quasi interamente su sedimenti sciolti sabbioso-argillosi e qui si sono verificati crolli di case parziali o totali; Cesi Villa poggia su detriti grossolani cementati sovrastanti rocce carbonatiche, in cui il danneggiamento è risultato lieve. In tale paese la parte più moderna si trova a Cesi Bassa, quindi la causa dei danni va probabilmente ricercata in fenomeni di amplificazione delle onde sismiche all'interno dei materiali del terreno su cui poggiano le case.

Altro motivo di discussione hanno rappresentato le costruzioni dei tetti: alcuni solai sono stati costruiti in legno, altri in cemento; in vari casi in cui le pareti delle case avevano sopportato l'urto delle scosse, hanno ceduto sotto il peso e il carico aumentato dalle oscillazioni sismiche dei solai in cemento. Questo problema ha causato il sequestro da parte della magistratura delle abitazioni di un paese come Sellano, in cui in buona parte dell'abitato si trovano molte case inagibili.

Fig.2.2 Edifici danneggiati in località Sellano.



Per quel che riguarda i danni alle infrastrutture, si segnalano in generale l'interruzione di strade dovute ai crolli in roccia, come a Stravignano Bagni oppure nei pressi di Triponzo all'altezza della Balza Tagliata. Nei pressi di Biselli invece i crolli hanno causato danni al tetto di due viadotti parafrane. Infine si può ricordare il ricorrente danneggiamento che subiscono le strutture di riparo ai lati delle strade sottostanti versanti instabili, le quali a volte risentono dell'impatto prodotto dalla caduta dei blocchi franati, venendo deformate o addirittura lacerate.

2.6 I terremoti storici nell'Umbria sud-orientale.

L'Umbria sud-orientale è una zona storicamente sismica e l'elevata frequenza degli eventi oltre che la presenza dell'uomo nell'area hanno permesso che si tramandassero molte descrizioni e informazioni a volte dettagliate riguardo agli effetti maggiormente visibili e ai danni subiti dalle popolazioni.

Per raccontare il primo episodio di memoria storica, bisogna risalire fino al **99 a.c.**, in cui si testimonia di un terremoto che fece crollare un tempio a Norcia, oltre che far tremare le lance di Marte nel Foro di Roma. Ovviamente si tramandavano solo notizie che gli autori del tempo ritenevano degni di memoria.

A parte due episodi di cui non sono ben chiare le fonti, accaduti nel **69 a.c.** e nell'**801**, vagamente collocati nell'Appennino Umbro-Marchigiano, si arriva al **1279**, anno in cui un forte terremoto colpì l'area nei pressi di Nocera Umbra, causando ingenti danni alle abitazioni e ai vari castelli sparsi nelle valli adiacenti. All'altezza dell'attuale Serravalle del Chienti, una frana travolse il castello, uccidendo le 500 persone insediate in quel luogo. Altri paesi colpiti furono Camerino, Foligno, Spello.

Nel **1324** la Val Nerina fu colpita da uno dei terremoti più forti della zona, al quale dai dati storici si attribuisce un valore X nella scala MCS. Morti e distruzioni gravissime si ricordano nell'abitato di Norcia, le costruzioni crollarono in gran parte, tra cui anche le mura cittadine; questo causò la fuga dei cittadini scampati alla morte, molti che vivevano sulle pendici dei monti scesero a valle. Il numero delle vittime è discordante, ma sempre dell'ordine di qualche migliaia di persone; addirittura qualcuno sostenne che nel paese di Preci non ci fu neppure un sopravvissuto.

La Val Nerina subì un altro violento scuotimento nel **1599**; il paese più vicino all'epicentro in quel caso fu Cascia, nei quali dintorni le vittime furono alcune decine. Norcia venne ancora danneggiata, insieme ad altri paesi come Montesanto ed Annifo. Tale terremoto è ricordato anche perché avvenne in inverno e la popolazione di Cascia fu abbandonata a sé stessa, senza che la reggente amministrazione papale intervenisse in alcun modo.

A partire dal 1700 i terremoti di cui si ha notizia sono molto più frequenti e si alternano spazialmente in due aree rispettivamente più a nord e soprattutto più a sud della zona colpita dalla sequenza sismica del 1997, come è possibile notare nella fig. 2.3 che riassume i terremoti catalogati. Ben evidente è la situazione intorno a Norcia, sede dei terremoti più violenti e anche più frequenti.

Il 14 gennaio del **1703** avvenne uno dei più violenti terremoti che probabilmente la storia italiana ricordi, valutato di intensità XI della MCS. Le scosse durarono per quasi un anno, di cui tre principali si susseguirono nel giro di due settimane; l'area interessata fu molto vasta, comprendente gran parte dell'Italia centrale. Le vittime furono 10000, di cui 2000 solo in Umbria, nella qual regione una cinquantina di località andò completamente distrutta, altrettante subirono crolli estesi a gran parte del patrimonio edilizio, più di un centinaio subì gravi danni. Norcia e Cascia furono quasi completamente distrutte, di cui la seconda resa inabitabile; Cerreto di Spoleto, Sellano, Arquata del Tronto, Spoleto subirono gravi danni. Le scosse furono avvertite da Bologna a Napoli e anche se appena percettibili si propagarono fino a Milano, Trento e Venezia. I danni causarono una grave crisi economica, con l'interruzione di molte attività, ciò determinò anche massicce migrazioni.

Passarono pochi anni che l'alta Val Nerina si ritrovò di nuovo alle prese col terremoto: inevitabili le persistenti conseguenze sui paesi di Norcia e Cascia, in cui si contarono ancora vittime per alcune centinaia; la crisi economica si aggravò ulteriormente e la ripresa fu sempre più lenta anche a causa degli aiuti inadeguati.

Il **1747** segna lo spostarsi dell'attività sismica ad una zona più settentrionale, nei pressi di Gualdo Tadino. Oltre quest'ultimo subirono danni Nocera Umbra, Annifo, Assisi ed altri piccoli abitati. Le vittime furono quasi inesistenti, in quanto al momento della scossa maggiore la gran parte della popolazione era nei campi a lavorare. Appena quattro anni più tardi, nel **1751**, la stessa zona venne ancora colpita, con quattro paesi rasi al suolo e crolli in altri venti. I territori di Gualdo Tadino, Nocera Umbra e Gubbio subirono i danneggiamenti più gravi.

Una sequenza sismica che durò un anno e mezzo, fece la sua comparsa nella zona tra Foligno e Sellano, mentre decorreva l'anno **1791**. La distribuzione dei danni fu molto simile a quella del 1997: Afrile, Apagni, Forfi, Leggiana, Ottaggi, Pale, Rasiglia, Verchiano, Vio sono solo alcuni dei paesi colpiti in quel lontano terremoto e in quello recente. I due abitati di Sellano e Foligno subirono gravi lesioni agli edifici, anche perché a quel tempo ancora sussisteva un'edilizia povera e vulnerabile. Peculiarità di questo evento fu la diffusa perdita per crollo delle storiche "palombari", torrette la cui parte superiore serviva da piccionaia, erette nell'Umbria tra il 1600 e il 1700, spesso in disuso e quindi più vulnerabili agli scuotimenti.

Spesso sottovalutato per la difficile reperibilità delle fonti, il terremoto del **1815** nella Val Nerina tra Sellano e Norcia crea danni diffusi, ormai ben documentati dai periti del tempo, i maestri muratori.

Confermando la ormai nota attività sismica presente nella Val Nerina, a sud di Sellano la terra tremò anche nel **1838**, mettendo a dura prova gli edificati di pessima qualità e in cattivo stato di conservazione di alcuni paesi, tra cui lo stesso Sellano. Effetto del terrore che inevitabilmente si accompagna al terremoto furono le immaginarie fiammate che provenivano da spaccature nel terreno a Spoleto, poi associate da un perito pontificio agli incendi che imperversavano nell'abitato. Più reali furono sicuramente i macigni che causarono il crollo di alcune case staccandosi dai monti vicini, come accadde nei pressi di Biselli e a Grotte.

Tre sono ancora i sismi che colpiscono la Val Nerina implacabilmente nell'800:

- **1859**: vigilia dell'annessione dell'Umbria al regno d'Italia; lo sconvolgimento politico portò all'arrestarsi delle ricostruzioni, vanificando l'ottimo lavoro dell'amministrazione

pontificia nel redigere l'inventario dei danni e nonostante una delle prime leggi in materia di edilizia sottoposta agli effetti sismici;

- **1879**: il terremoto è accompagnato da violentissime precipitazioni; si attesta la massima manifestazione sismica coincidente con il periodo di eccessiva depressione barometrica; alcuni paesi furono colpiti da pioggia di sabbia e la montagna di S.Benedetto nei pressi di Amelia venne arrossata dalla stessa sabbia;
- **1898**: a nord ed est di Sellano vengono colpiti paesi come Mevale, Rasenna, Renaro, Preci, Chiusita, coinvolti nel recente sisma.

Avvicinandoci ai giorni nostri, nel **1915** la terra trema nei pressi di Colfiorito, danneggiando Cesi, Dignano ed Assisi; purtroppo le informazioni sono rade per la concomitante prima guerra mondiale che mise in secondo piano l'evento.

Ormai arriviamo ai nostri tempi e la cronaca investe ancora la tormentata Val Nerina, sia nel **1974** che nel **1979**, riportando notizie di paesi crollati, monumenti storici rovinati e una serie notevole di danni diffusi.

Penultimo terremoto quello di Gubbio del **1984**, in cui si attestano i danni al patrimonio artistico già intaccato di Assisi, Perugia e Gubbio. Inoltre ripercussione economica fu il progressivo allontanamento del turismo dalla regione, in un momento in cui questo rappresentava una buona risorsa; fu un effetto della potenza dei mass media che fecero risuonare l'evento creando timore anche nelle popolazioni non colpite; le strutture ricettive turistiche erano intatte, ma ormai lo scompiglio era stato creato; un analogo fenomeno avvenne col terremoto del 1997. Fu colpita anche l'attività agricola, motore trainante dell'economia umbra nella sua storia.

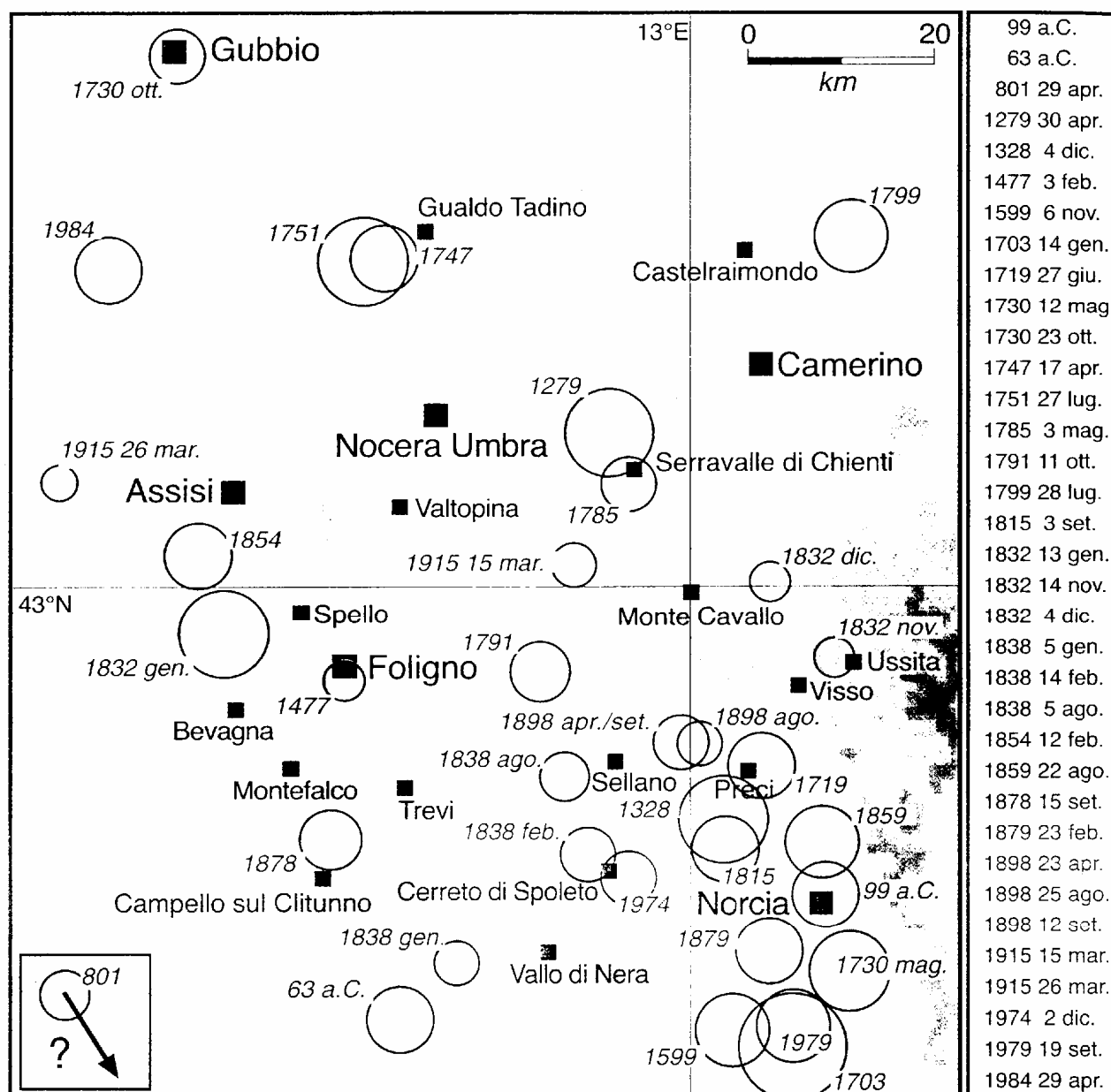


Fig2.3 Eventi sismici storici, da ING, "I terremoti dell'Appennino Umbro - Marchigiano, area sud orientale dal 99 a.C. al 1984".

CAPITOLO III

I Sistemi Informativi Territoriali (SIT)

3.1 Definizione, potenzialità e componenti dei SIT.

Un SIT generalmente è un insieme di apparecchiature, procedure e persone che hanno il compito di raccogliere, organizzare, selezionare, archiviare e comunicare i dati riguardanti l'attività di un'organizzazione, in modo da ottenere le informazioni necessarie per operare le scelte migliori quando si debba prendere una decisione.

Tra le possibili definizioni di SIT esistono, ad esempio, quella data da Burrough (1998): “[...]un potente set di strumenti per raccogliere, immagazzinare, recuperare, elaborare e rappresentare dati dal mondo reale per un particolare scopo” e quella di Aranoff (1989): “[...]insieme di procedure basate sull'utilizzo di sistemi informatici, usate per archiviare ed elaborare dati georeferenziati”.

I dati geografici rappresentano fenomeni del mondo reale ed oggetti, sono georiferiti, ovvero è conosciuta la loro posizione rispetto ad un sistema di coordinate, sono caratterizzati da attributi che sono indipendenti dalla posizione e sono relazionati spazialmente gli uni agli altri.

Il termine “sistema” si riferisce all'integrazione tra l'utente e la macchina per manipolare l'informazione, analizzarla e prendere decisioni.

Le componenti principali di un SIT è rappresentata da una piattaforma hardware-software, la quale può essere composta da workstation, personal computer o terminale, da un sistema operativo e pacchetti applicativi; ad essa si possono collegare delle periferiche quali scanner, digitalizzatori, GPS, stampanti, plotter, ecc.

I moduli software di base di un SIT permettono le seguenti operazioni:

- immissione e verifica dei dati;
- immagazzinamento dei dati e manipolazione del data base;
- trasformazione dei dati;
- analisi;
- output dei risultati.

Infine, un'altra componente di un SIT è costituita da un insieme di persone, un'organizzazione capace di gestire progetti che utilizzano questo strumento.

L'immissione dei dati comporta una conversione dal formato originale ad un nuovo formato che può essere utilizzato dal SIT. Di solito i dati si presentano come:

- dati georiferiti;
- attributi non associati a coordinate.

I dati georiferiti rappresentano oggetti spaziali, nella forma di punti linee e poligoni, mentre

gli attributi rappresentano le loro caratteristiche qualitative o quantitative. E' possibile introdurre dati già in formato digitale oppure immettere manualmente dati, cioè trasformare un dato da analogico in formato digitale. Qualora si disponga di dati già in formato digitale spesso è necessario trasformare i files in formati utilizzabili dal software con il quale l'utente lavorerà. La trasformazione è anche importante per scambi di informazioni tra utenti oppure per eseguire tipologie di analisi esterne al SIT.

L'acquisizione diretta di dati in formato digitale permette di risparmiare molto tempo ed è per questo un'alternativa molto allettante, nonostante ciò presenta degli aspetti negativi: bisogna porre molta attenzione qualora si integrino dati provenienti da fonti diverse perché questi potrebbero non essere compatibili per il sistema di coordinate utilizzato o per la scala scelta oppure per i diversi metodi di interpolazione e classificazione utilizzati.

Problemi nell'integrazione di più dati sono frequenti quando l'area in studio attraversa limiti amministrativi: ci si trova spesso a lavorare su dati che hanno diversi sistemi di coordinate nonché diversi metodi di classificazione e strategie di campionamento.

L'alternativa all'input di dati già in formato digitale è l'input manuale di dati da un formato analogico su supporto cartaceo.

La qualità del dato dipende dalla qualità originale del dato analogico e dall'abilità e accuratezza dell'operatore.

La scansione è certamente il metodo più diretto e veloce per l'immissione.

Qualunque sia la modalità con la quale i dati vengono immessi, particolare attenzione va posta alla georeferenziazione, soprattutto quando si lavora con dati provenienti da più fonti: bisogna assicurarsi che vengano utilizzate le stesse proiezioni e lo stesso sistema di coordinate.

In un SIT i dati vengono immagazzinati in modo che siano garantite le relazioni fra dati spaziali (topologia) e gli attributi; la loro manipolazione viene affidata ad un Data Base Management System interno al SIT.

Le funzioni di un SIT sono volte alla:

- elaborazione e analisi dei dati spaziali;
- elaborazione e analisi degli attributi;
- analisi integrata dei dati spaziali e degli attributi.

Nel primo gruppo rientrano le trasformazioni geometriche, le trasformazioni tra sistemi di coordinate e l'editing di elementi grafici. Le operazioni sugli attributi comprendono l'editing e le funzioni di interrogazione mentre nell'ultimo gruppo rientrano varie funzioni come quelle di classificazione, di sovrapposizione, di vicinanza e di connettività. La

classificazione è l'operazione che permette di assegnare un attributo ad un oggetto o ad un gruppo di oggetti; la sovrapposizione permette di fare calcoli fra due o più mappe oppure di individuare aree in cui ricade uno specifico set di condizioni (ad esempio sovrapponendo carte della vegetazione, del suolo, della pendenza ecc.). Le operazioni di vicinanza in generale permettono di valutare le caratteristiche di un'area prossima a determinati punti, linee e poligoni; in questa categoria rientrano: le funzioni che permettono di calcolare la pendenza e l'esposizione, l'interpolazione, la creazione di poligoni di Thiessen, ecc. Tra le operazioni di connettività rientrano il calcolo della distanza, la creazione di corridoi (buffer) attorno ad elementi della mappa, la creazione di reti, cioè di un set di interconnessioni lineari utilizzate di solito per spostare risorse da un luogo ad un altro.

L'output dei dati può essere effettuato in tre modi: hardcopy, softcopy, digitale.

Il primo tipo implica un dato di uscita analogico, su carta, pellicole fotografiche, ecc. ; il secondo tipo di output è rappresentato da immagini temporanee su schermo.

L'output in formato digitale è rappresentato dai files di immagini, tabelle o metafiles grafici nel formato gestito dal SIT che può essere direttamente utilizzato.

3.2. Georeferenziazione: proiezioni e sistemi di riferimento.

3.2.1 I sistemi di riferimento.

L'analisi dei dati in un SIT richiede che ad essi siano attribuite delle coordinate spaziali relative o assolute e, quando si ha a che fare con dati provenienti da fonti diverse e/o con diverso riferimento, è necessario che essi vengano normalizzati ad uno stesso sistema, per essere paragonabili e sovrapponibili.

Uno degli aspetti salienti dell'informazione geografica digitale è la georeferenziazione che permette di definire in modo univoco la posizione di un oggetto nello spazio.

I sistemi di rappresentazione di entità rispetto ad un origine, fissata in un piano di riferimento, sono il sistema cartesiano e il sistema di coordinate polari. Nel primo caso un punto è espresso come una coppia di coordinate (X, Y) e come riferimento si assume una coppia di assi x, y tra loro ortogonali; nel secondo caso un punto è espresso dalla coppia (ϕ , r) dove r è il raggio vettore e ϕ l'angolo che esso forma con l'asse orizzontale.

Per rappresentare dei punti su di una sfera, che approssima la terra con un certo errore, si usano coordinate polari tridimensionali (λ , ϕ , r). Vengono scelti come origine due piani ortogonali, che si intersecano nel centro della sfera. Un piano passa per l'equatore e l'altro

per il Royal Observatory of Greenwich, come stabilito da una convenzione nel 1884.

Il raggio r indica il raggio della sfera, e, se questo viene supposto costante, perde il suo significato.

La latitudine λ di un punto è definita come l'angolo che il raggio passante per esso ed il centro della terra forma con il piano equatoriale ed è definita nell'intervallo $0-90^\circ$. Il simbolo N (nord) è assunto per l'emisfero boreale, mentre il simbolo S (sud) per l'emisfero australe. La longitudine ϕ è l'angolo, misurato a partire dall'equatore, che il punto forma con il piano passante per Greenwich e varia nell'intervallo $0-180^\circ$, dove valori positivi indicano che ci si muove da Greenwich verso E; ci si muove verso W nel caso opposto. Gli angoli vengono suddivisi in gradi, i quali vengono suddivisi in primi, secondi e centesimi di secondo per poter determinare qualsiasi distanza.

Tale sistema prende il nome di coordinate geografiche ed è il più comunemente usato.

3.2.2 Le proiezioni cartografiche.

La terra non è una sfera perfetta, ma a causa della rotazione essa subisce uno schiacciamento ai poli per cui ha una forma ellissoidale, che viene chiamata ellissoide di rotazione o sferoide. Una proiezione cartografica non è altro che un'operazione di trasformazione matematica tra coordinate sferiche in tre dimensioni e coordinate bidimensionali, che consente di adattare, con un errore accettabile, una superficie curva ad una superficie piana; qualsiasi tipo di analisi con i SIT viene effettuata assumendo un piano come riferimento.

Le proiezioni cartografiche più conosciute sono di tre tipi:

- proiezioni cilindriche;
- proiezioni azimutali;
- proiezioni coniche.

Le prime si basano sul concetto di un cilindro avvolto attorno ad una sfera o ad essa secante. La mappa risultante avrà una forma rettangolare.

Le seconde sono invece assimilabili ad un piano tangente o secante una sfera, per cui la mappa risultante sarà di forma circolare. Le ultime si basano sul concetto di un cono tangente o secante una sfera e la distorsione derivante assumerà la forma di un ventaglio.

Inoltre ognuna delle proiezioni elencate può essere applicata in modi diversi: tangente in una direzione (proiezione normale); tangente a 90° (proiezione trasversale); in modo obliquo, con qualsiasi angolo di incidenza (proiezione obliqua).

Le proprietà di una proiezione cartografica si distinguono sulla base dell'errore che essa comporta. Le *proiezioni conformi* sono quelle che lasciano inalterate le forme originali per

cui gli angoli vengono conservati . Le *proiezioni equivalenti* sono quelle che mantengono invariate le aree, ma gli angoli e le forme vengono distorti. Le proiezioni che conservano l'equidistanza sono invece quelle che lasciano inalterata la dimensione delle linee in una determinata direzione (*proiezioni equidistanti*).

Non tutte le proiezioni attualmente disponibili vengono utilizzate di routine. Nel mondo la percentuale di utilizzazione delle varie proiezioni cartografiche è la seguente:

- proiezione trasversale di Mercatore (85%);
- proiezione policonica (10%);
- proiezione conica conforme di Lambert (5%).

3.2.2.1 La proiezione trasversale di Mercatore

La proiezione trasversale di Mercatore (UTM) è il sistema che per primo è stato adottato dall'esercito degli Stati Uniti del 1940.

Essa possiede le seguenti caratteristiche:

- si basa sulla versione Gauss-Kruger della proiezione trasversa di Mercatore;
- è valida solo per zone poste tra latitudine 84° N e 80° S;
- le unità di misura sono in m;
- il globo è suddiviso in 60 zone di 6° di longitudine ciascuna progressivamente numerate da E verso W;
- Il globo è inoltre suddiviso in zone di 8° di latitudine ciascuna;
- l'origine di ogni zona è all'equatore, nel punto di intersezione con il meridiano centrale;
- Per ogni zona posta ad E dell'origine viene assegnato un valore minimo di 500.000 m;
- esiste una speciale convenzione per riconoscere il Nord: procedendo verso N la latitudine viene incrementata rispetto allo 0 (equatore), mentre, procedendo verso S la latitudine viene incrementata rispetto al valore 1.000.000 (equatore);
- ogni sezione meridiana è contrassegnata da un numero, mentre ogni sezione di paralleli porta una lettera dell'alfabeto;
- lo sferoide utilizzato è in genere quello Internazionale, ma vengono anche utilizzati gli sferoidi di Clarke 1866 (Africa), Clarke 1880 (nord America), Everest o Bessel (per alcune parti del Sud America e del Sud Est asiatico).

Quando una zona da mappare giace in più di una zona UTM, allora la zona viene estesa di 3° di longitudine sia ad E che ad W, evitando così il problema della sovrapposizione. Tuttavia l'errore commesso ai bordi diventa maggiore. L'Italia si trova a cavallo dei fusi 32, 33 e 34, per cui si possono presentare dei problemi di sovrapposizione.

In Italia esiste un'applicazione nazionale della proiezione UTM che è la proiezione Gauss-Boaga, il cui riferimento è il meridiano di Monte Mario, e le coordinate chilometriche vengono misurate a partire da 1500 a sinistra e da 2520 a destra del meridiano di riferimento. Tale proiezione viene utilizzata nelle carte tecniche regionali.

3.3 Costruzione di un SIT.

Il punto di partenza della costruzione di un GIS è rappresentato dal mondo reale. Di questo viene fatta un'astrazione, si cerca cioè di creare un modello selezionando le informazioni e combinandole nel modo in cui esse risultano più comprensibili. La selezione e l'immagazzinamento degli oggetti di cui si ha bisogno e la loro organizzazione rappresenta la costruzione di un data base. Un data base da solo rappresenta l'insieme dei dati immagazzinati, mentre un data base management system rappresenta l'organizzazione e la maniera di selezione dei dati immagazzinati. I dati vengono poi analizzati secondo il modello che si ritiene più opportuno ed i risultati affidati agli utenti finali che rappresentano il tramite verso il mondo reale da cui si era partiti.

3.3.1. Modelli della realtà

Quando le informazioni vengono scambiate fra un elevato numero di persone, e' necessario, che i modelli della realtà vengano definiti in modo rigoroso per evitare che nascano ambiguità nella comunicazione.

Esistono due modalità estreme di percepire e descrivere la realtà:

- considerare lo spazio come occupato da **oggetti** identificati attraverso la posizione che occupano, mediante le coordinate, e le loro proprietà;
- considerare come varia una certa proprietà di nostro interesse nello spazio; la variazione si considera continua e descrivibile mediante una funzione, in questo caso si dice che la realtà è vista come un campo continuo.

Il modello della realtà ad oggetti si basa su entità spaziali che sono ulteriormente caratterizzate da attributi e localizzate con coordinate, le tipologie di entità spaziali a cui possono essere ricollegati tutti gli oggetti sono: punti, linee, poligoni.

Nel modello a campo continuo è necessario fare un' approssimazione della realtà: questa viene suddivisa in unità discrete perché, nonostante si assuma che le proprietà considerate varino in modo continuo, spesso non è possibile descrivere la variazione, che può esser anche molto complessa, con una semplice funzione. L'approssimazione sarà tanto migliore

quanto minore è la dimensione delle unità (celle) e cioè quanto migliore è la risoluzione.

Dalla visione della realtà mediante questi due modelli di astrazione derivano le due tipologie di struttura dei dati in un SIT: vettoriale e raster.

E' importante sottolineare inoltre che nei GIS i dati non sono puramente geometrici ma devono essere mantenute e garantite tutte le informazioni sulle relazioni spaziali fra i diversi elementi come la connessione, l'adiacenza, l'inclusione: deve cioè essere specificata la **topologia**. Inoltre ai dati spaziali devono esser associati dati descrittivi dei vari oggetti o di una proprietà, cioè gli **attributi**.

3.3.1.1 Il modello vettoriale.

Il modello vettoriale descrive la realtà per mezzo di oggetti discreti rappresentati da punti, linee e poligoni. In generale per dati vettoriali si intendono dati geometrici caratterizzati e memorizzati attraverso le coordinate di punti significativi degli elementi stessi.

Punti: entità adimensionali, descritte da un'unica tripletta di coordinate (x, y, z) o semplicemente da una coppia (x, y). Ad ogni punto possono essere associati un identificativo e l'attributo o gli attributi ad esso corrispondenti. Con i punti si possono rappresentare delle informazioni ben localizzate, come ad esempio una stazione di misura (stazione pluviometrica, idrometrica, accelerometrica, ecc.) e generalmente le informazioni puntuali vengono poi interpolate per valutare gli attributi in zone prive di osservazioni. La realtà rappresentabile sotto forma di un punto può variare in funzione della scala utilizzata. Ogni punto è caratterizzato da un codice all'interno del software e da un codice assegnato dall'utente.

Linee: sono entità monodimensionali, rappresentate da due o più triplette o coppie di coordinate, infatti ogni linea è costruita per mezzo di due o più punti. I punti che identificano l'inizio e la fine della linea sono chiamati nodi mentre quelli che stanno all'interno e permettono di disegnare l'andamento della linea sono chiamati vertici. Le linee servono per rappresentare gli elementi che si associano ad elementi quali strade, oleodotti, oppure a isolinee, come isobate, isoipse, isoiete, ecc. Anche alle linee possono essere associati degli attributi.

Poligoni: i poligoni vengono detti anche dati areali, in quanto rappresentano l'area racchiusa da un elemento lineare che inizia e finisce nello stesso punto. Sono quindi tipici elementi bidimensionali. In materia ambientale essi definiscono aree con suoli omogenei, aree aventi lo stesso tipo di coltivazione, unità geologiche ecc. I poligoni vengono identificati sulla base

della loro topologia (posizione relativa ad altre entità) per cui essi possono essere adiacenti ad altri poligoni, se hanno in comune delle linee di contorno oppure possono racchiudere o essere racchiusi a loro volta da altri poligoni. Ogni poligono possiede un codice interno e uno attribuito dall'utente.

Le relazioni esistenti tra gli oggetti sono rappresentate mediante il **Modello topologico** che registra le relazioni spaziali tra i vari elementi. L'unità di base è il segmento, che inizia con un nodo e termina con un altro nodo, per intersezione con un'altra linea o per il posizionamento di un altro nodo. Ogni linea riporta i nodi con i quali inizia e termina (ingl. From Node, To Node) e il poligono che si trova a destra o a sinistra della linea. Ogni poligono riporta gli archi dai quali è formato ed il suo codice interno, mentre ogni nodo contiene il suo codice e l'elenco degli archi che ad esso si connettono. Per cui esistono delle relazioni ben definite tra i vari elementi e lo schema concettuale utilizzato è di tipo relazionale.

Una unità vettoriale è caratterizzata dal fatto che la sua posizione è definita con estrema precisione così come le relazioni topologiche fra due o più unità. All'interno di una unità vettoriale non è ammessa variazione, nel senso che un attributo si riferisce all'intera unità senza possibilità di ulteriori suddivisioni.

3.3.1.2 Il modello raster.

Nel modello raster la realtà viene discretizzata in celle regolari di forma regolare quadrata, rettangolare, esagonale etc. Le celle prendono il nome di pixels, la dimensione dei pixels è determinata dalla **risoluzione** necessaria per rappresentare la variazione di un attributo per un dato scopo. Ad ogni cella è associato un attributo e nel caso gli attributi siano più di uno questi vengono immagazzinati su livelli differenti.

Ogni mappa raster ha una sua origine spaziale, che di solito è posizionata nella cella in alto a sinistra.

Un dato raster occupa molta più memoria di un dato vettoriale, per questo spesso è necessario comprimere i dati per renderli più maneggevoli.

Uno degli svantaggi della struttura a griglia regolare è quello di avere un surplus di celle in zone dove la proprietà considerata si presenta distribuita in maniera omogenea così a comportare un inutile impiego di memoria.

Esistono anche griglie formate da celle irregolari: in zone in cui una proprietà vari notevolmente nello spazio, celle di piccole dimensioni permetteranno di rilevarne

l'andamento mentre, in altre zone dove essa è più regolare, le celle possono essere di dimensioni maggiori. Questo consente un risparmio di memoria senza perdita di informazione.

Tipicamente dati strutturati in formato vettoriale sono quelli che derivano dalla digitalizzazione manuale di mappe, dai CAD, da rilievi di campagna, invece dati memorizzati in formato raster sono quelli generati con scanner oppure le immagini telerilevate.

Il metodo raster e quello vettoriale rappresentano due approcci diversi per modellare l'informazione geografica, entrambi presentano dei vantaggi e degli svantaggi.

Vantaggi del modello raster:

- struttura dei dati semplice;
- operazioni di sovrapposizione e somma agevoli;
- possibilità di integrazione con immagini telerilevate;
- simulazione avvantaggiata dall'isodimensionalità delle celle;
- tecnologia sviluppata ed a basso costo;
- facile programmazione delle proprie applicazioni.

Vantaggi del metodo vettoriale:

- struttura dei dati compatta e non ridondante;
- grafica accurata;
- perimetri e aree sono ben rappresentati;
- possibilità di analisi di reti;
- immediato aggiornamento dei dati.

Svantaggi del modello raster:

- largo impiego di memoria per l'immagazzinamento dei dati, in molti casi si ha ridondanza;
- errori nelle stime di aree e perimetri;
- difficoltà per analisi di reti;
- visualizzazione non perfetta.

Svantaggi del metodo vettoriale:

- complessa struttura dei dati;

- complesse operazioni di sovrapposizione e adiacenza;
- plottaggio costoso;
- tecnologia costosa.

Fino a qualche anno fa il modello vettoriale e quello raster erano considerati due alternative opposte: il primo era considerato migliore per rappresentazioni cartografiche accurate, il secondo veniva utilizzato soprattutto per operazioni di sovrapposizione.

Oggi si tende ad integrare le due strutture soprattutto perché sono disponibili monitor e stampanti ad alta risoluzione che rendono anche il formato raster adatto a rappresentazioni cartografiche di dettaglio. Sono anche disponibili SIT che supportano sia la struttura raster che quella vettoriale e che hanno programmi per la conversione da uno all'altro. I recenti software orientati agli oggetti permettono di utilizzare contemporaneamente dati in formato raster e vettoriale perché il dato, sia che si tratti di punti, linee, poligoni o pixels è considerato come un unico oggetto.

3.4. L'organizzazione dei dati: i data base.

L'organizzazione dei dati è l'elemento più importante dei dati di un SIT; attributi ed entità spaziali che vengono immessi nel computer devono necessariamente essere organizzati in modo da permetterne in modo efficiente l'accesso, la manipolazione e l'aggiunta. Questo è possibile per mezzo di un **data base management system** (sistema di mantenimento dei dati), cioè un programma per organizzare e gestire un database; Esso può organizzare i dati sulla base delle richieste dell'applicazione. Generalmente tali programmi usano delle interfacce, per cui non è necessario che l'utente conosca la programmazione di un DBMS. Un **data base** (banca dati) costituisce l'informazione immagazzinata e le relazioni reciproche esistenti tra i vari oggetti.

I database e i modelli di strutturazione dei dati si basano sui seguenti concetti:

Entità: è un oggetto identificabile per il quale vengono raccolti gli attributi ad esso associati. Si può trattare di una persona, di un oggetto geografico ecc.;

Elemento: è una delle proprietà di un'entità, può essere una stringa od una quantità numerica. I valori assegnati agli elementi descrivono la proprietà di ogni entità considerata. Essi vengono anche chiamati **campi** del data base;

Record: è l'insieme degli elementi per ciascuna entità. Può essere identificato come una riga

di una tabella. Un record è diviso in campi, ognuno dei quali contiene una singola informazione (es. o il nome, o il cognome o l'indirizzo di un individuo);

Un record può essere selezionato tramite una **chiave**, che può essere formata da uno o più campi (solo il nome o nome + cognome). I campi che non sono chiave si chiamano **attributi**.

Identificatore: è un elemento di una entità che serve per mettere quest'ultima in relazione con altri elementi della stessa identità. Può anche essere composto di più elementi.

Chiave: è l'identificatore unico per un'entità. Ci possono essere più chiavi per un set di record (identificatori), ma una soltanto deve essere scelta come chiave primaria.

Attributo: si tratta di ogni altro elemento che non è definito come chiave primaria.

I DBMS si basano su schemi concettuali con i quali vengono strutturati i dati. Si possono riassumere in: gerarchico, reticolare, relazionale e ad oggetti. I primi due sono ormai superati e non vengono utilizzati dagli attuali data base pertanto verranno descritti solo il modello relazionale e ad oggetti.

3.4.1. Il modello relazionale.

In un database relazionale i dati sono registrati come singoli records chiamati “**tuples**” costituiti da una serie di campi ognuno dei quali contiene un attributo. Due tuples sono raggruppati insieme a formare una tabella bidimensionale conosciuta come “**relazione**”, ogni relazione costituisce di solito un singolo file. L'interrogazione nell'ambito di una stessa tabella può essere fatta mediante una caratteristica di un qualsiasi campo (es. l'insieme degli individui con lo stesso nome di battesimo o lo stesso anno di nascita). Le ricerche possono essere fatte anche in più tabelle congiuntamente. Per questo le tabelle si devono collegare mediante dei campi comuni che esse possiedono (chiavi). In un database relazionale ogni record è identificato per mezzo di un codice che permette di estrarre gli attributi del singolo record da ogni relazione. Le relazioni che possono esistere tra le tabelle sono del tipo uno-a-uno, uno-a-molti e molti-a-molti.

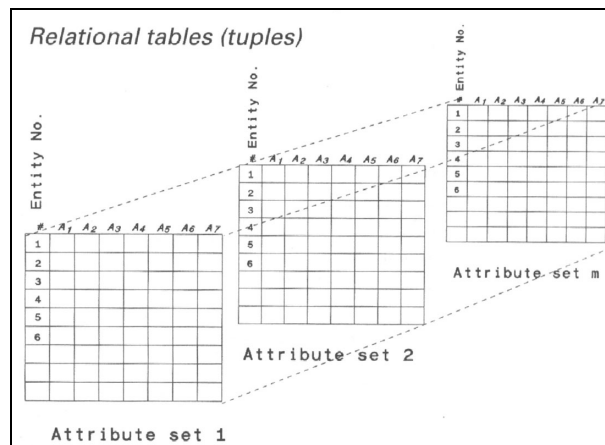


Fig.3.1 Struttura dei dati in un data base relazionale, da Burrough,
“Principles of Geographical Information System”

Dal processo di interrogazione di varie tabelle si può produrre una ulteriore tabella che fornirà solo le informazioni richieste. Quest’ultima non sempre deve essere immagazzinata, ma può essere semplicemente consultata come informazione virtuale.

Il modello relazionale è molto flessibile perchè permette di soddisfare ogni tipo di interrogazione: diversi tipi di dati possono essere recuperati, combinati e comparati; inoltre l’aggiunta di dati è molto semplice perchè comporta soltanto l’aggiunta di tuples o intere tabelle. E’ utile quando si lavori con records che abbiano lo stesso numero di attributi e quando non esista alcuna relazione gerarchica.

Gli aspetti negativi sono legati alla possibile ridondanza dell’informazione e al fatto che quando le relazioni fra tabelle sono complesse il computer può richiedere anche molto tempo per effettuare le operazioni.

3.4.2. Il modello a oggetti.

Un database orientato agli oggetti permette di trattare qualsiasi entità, seppur complessa, unicamente come un oggetto. Gli oggetti sono definiti come “entità tangibili o visibili, o qualcosa che può essere appreso intellettualmente o verso il quale sono diretti un pensiero od una azione” (Booch, 1991). L’oggetto è un’entità con uno stato complesso che può essere descritto mediante attributi, ed un insieme di procedure e metodi che si riferiscono all’oggetto. I singoli oggetti sono organizzati in classi di fenomeni simili. La *classe* è un insieme di oggetti che condividono la stessa struttura e un comportamento comune. Gli oggetti appartenenti ad una classe hanno gli stessi attributi ai quali si possono applicare gli

stessi metodi e procedure. Ogni classe ha una *superclasse* dalla quale può ereditare attributi e metodi. Le operazioni della superclasse sono valide anche per la subclasses . La *classificazione* è l'inclusione di oggetti con caratteristiche particolari comuni nella stessa classe, mentre la *generalizzazione* è il processo inverso e cioè l'aggregazione di oggetti con caratteristiche generali comuni in classi più ampie.

Aggregazione è il processo di formazione di nuove classi a partire da oggetti differenti.

Le relazioni fra oggetti di una stessa classe o fra classi diverse sono assicurate per mezzo di collegamenti esplicitamente definiti. Gli oggetti del data base interagiscono in un sistema e reagiscono quando ricevono o spediscono messaggi richiedenti informazioni. La creazione, l'accesso o la cancellazione dello stato di un oggetto sono effettuati inviando messaggi all'oggetto stesso.

Gli attributi di un oggetto sono immagazzinati insieme all'oggetto stesso che è identificato per mezzo di un unico codice identificativo all'interno del database.

3.5 Applicazione dei SIT agli studi di pericolosità.

Una delle applicazioni possibili utilizzando i SIT è lo studio della pericolosità delle frane.

Esistono vari metodi per generare mappe di pericolosità che sono brevemente riassunti nei paragrafi seguenti.

3.5.1 Inventario di frane.

In questo primo semplice metodo, i SIT sono utilizzati solo per memorizzare e visualizzare le informazioni relative ai movimenti franosi, in modo da presentare la distribuzione spaziale di tutti i fenomeni o solo dei tipi scelti. Infatti la procedura consiste nella digitalizzazione di tutti i fenomeni ai quali sono associati degli attributi quali il tipo di frana, l'attività, la profondità, le caratteristiche del sito, la zona di distacco o il corpo di frana. Selezionando uno degli attributi è possibile creare delle mappe tematiche, per avere un'idea della collocazione dei diversi elementi relativi alle frane.

L'inventario delle frane è un documento necessario per successive analisi di densità. Considerato singolarmente, l'inventario fornisce esclusivamente delle indicazioni qualitative sulle zone pericolose, punto di partenza per ottenere informazioni quantitative desunte dalle analisi descritte in seguito.

3.5.2 Analisi euristica.

Questo metodo non richiede la digitalizzazione di molte mappe del territorio, ma invece necessita di buone conoscenze desunte da lavori sul campo e da fotointerpretazione che richiedono parecchio tempo. L'analisi è condotta combinando più mappe di parametri (geologia, pendenza, geomorfologia, uso del suolo, ...) e assegnando alle classi di ogni parametro dei valori pesati ed eventualmente un peso ad ogni parametro. Persone competenti decidono quali mappe vanno utilizzate e quali pesi devono essere assegnati. Quindi, riassumendo, bisogna procedere con una classificazione delle mappe parametriche, assegnare valori pesati ad ogni classe (ad esempio in una scala da 1 a 10), assegnare dei pesi ad ogni mappa parametrica; infine calcolare la somma pesata per ogni unità di territorio considerato, sovrapponendo tutte le precedenti mappe di valori: ne risulta una mappa qualitativa della pericolosità.

Il metodo euristico ha il difetto della soggettività dell'analista, in quanto, come già accennato, egli deve abbinare dei pesi ai vari parametri. Perciò fondamentale è il bagaglio d'esperienza, la documentazione di studi precedenti o la conoscenza di campo dei fattori casuali, con i quali lo stesso analista può conoscere a fondo il problema e giustificare ogni sua scelta.

3.5.3 Analisi statistica.

Il cuore dell'analisi statistica consiste nella sovrapposizione di mappe di parametri e nel calcolo della densità di frane.

Una tecnica molto usata è l'analisi univariata, in cui si può valutare l'importanza di ogni parametro o della combinazione di alcuni parametri analizzandoli separatamente. Incrociando la mappa delle frane con ognuna delle mappe parametriche, si ottengono le densità percentuali delle frane in ogni classe di un parametro, desumendo da tale informazione i valori pesati da assegnare alle classi. Infine si calcola la somma pesata dei parametri in ogni pixel e si ottiene la mappa di suscettibilità alle frane.

Altra analisi statistica è quella multivariata che restituisce il contributo relativo di ogni parametro alla pericolosità di frane. L'analisi è basata sulla presenza o assenza dei fenomeni franosi all'interno di porzione di territorio predefinita. I metodi di analisi multivariata spesso richiedono un pacchetto applicativo statistico esterno, in grado di elaborare una gran

mole di dati. Infatti dopo aver determinato i parametri da inserire nell'analisi, dopo aver combinato le mappe parametriche con quella delle frane, viene creata una matrice; la matrice è esportata nel pacchetto statistico ed analizzata; i risultati vengono reimportati nel SIT per riclassificare il territorio in base alla distribuzione delle frequenze delle frane; infine si classifica la mappa secondo classi di pericolosità.

Un aspetto a favore dell'analisi statistica è il fatto che essa restituisce dei risultati più oggettivi rispetto ad esempio all'analisi euristica; questo perché il punto di partenza sono i dati reali e l'importanza relativa dei vari parametri deriva da essi e non da pesi assegnati arbitrariamente.

3.5.4 Analisi deterministica.

I metodi finora descritti non danno informazioni collegate ai parametri fisici che esprimono la stabilità dei versanti: per queste sono richiesti specifici modelli che necessitano di dati sullo spessore dei depositi, sulla pendenza, sulla pressione dei pori del terreno data dall'acqua, sugli angoli di riposo, eccetera. Quindi bisogna essere in possesso di mappe parametriche che riguardano i materiali e i profili verticali, mappe della tavola d'acqua basata su modelli e osservazioni di campo, mappe dettagliate della pendenza desunte da accurati modelli digitali del terreno.

La procedura consiste nell'applicare un modello di stabilità dei versanti, con il quale calcolare un parametro che esprima il Fattore di Sicurezza per ogni unità di territorio. Oppure si possono selezionare un certo numero di profili trasversali dal modello digitale del terreno, da esportare insieme alle mappe di parametri in un modello esterno di stabilità dei versanti. Se esistono informazioni probabilistiche sui fattori scatenanti (ad esempio piogge intense o eventi sismici) si può valutare poi la probabilità dei fenomeni franosi in connessione con il tempo di ritorno degli eventi che causano le frane.

Il metodo, per le informazioni dettagliate che richiede, è preferibile in aree territoriali ristrette.

CAPITOLO IV

Raccolta dati

4.1 Dati a disposizione.

La fase di raccolta dati ha occupato una notevole parte dello studio, in quanto il materiale preesistente si è rivelato esiguo e comprendente solamente la cartografia in formato cartaceo, non essendo disponibile alcun dato digitale. Quindi, la necessità di effettuare un lavoro manuale per trasferire i dati in formato digitale ha allungato i tempi di lavoro.

Come verrà descritto più dettagliatamente in seguito, è stata prodotta una banca dati digitale composta dal modello del terreno, dalla mappa geologica, dalla mappa delle frane e da quella dei danni agli edifici.

4.2 Identificazione degli effetti di superficie.

Gli effetti indotti dal terremoto rilevati sono le frane e i danni agli edifici.

La loro individuazione è stata possibile attraverso un'attività di fotointerpretazione, basata sulle immagini scattate dal volo dal titolo "Sisma 1997 Umbria-Marche" effettuato dalla Compagnia Generale di Foto Aeree, compiuto in data 25 ottobre 1997, cioè pochi giorni dopo la scossa che ha colpito la zona di Sellano. Le foto osservate hanno riguardato le strisciate 12, 13c, 14c, 15c, 16c, 17c, 18c, 19c, 20c, 21c, 22c, 23c, 24c. Il riconoscimento dell'area in questione è avvenuto tramite il raffronto tra le foto aeree e le ortofotocarte utilizzate poi come substrato topografico.

Il tipo di strumento utilizzato è stato uno stereoscopio Falcon II, la cui capacità di ingrandimento ha permesso di sviluppare soddisfacentemente le osservazioni eseguite.



Fig.4.1 Osservazione di fotoaeree tramite stereoscopio.

4.2.1 Individuazione delle frane.

Le foto aeree esaminate per individuare le frane di crollo rientrano in una porzione dell'area comprendente le strisciate 15c, 16c, 17c, 18c, 19c, 20c, 21c; questo perché l'area inerente è stata quella interessata dallo sciame sismico della metà di ottobre ed inoltre perché questa è la porzione di territorio in cui sussistono le condizioni topografiche necessarie per il verificarsi del tipo di frane studiato, cioè i crolli.

La possibilità di individuare le frane di crollo sulle foto è data dal fatto che le pareti di roccia da cui è avvenuto il distacco si presentano evidenti; generalmente si mostrano come una parte di roccia più chiara nell'insieme dell'ammasso roccioso, in quanto la parte stessa, essendo esposta da poco tempo, non è ancora ricoperta dalle patine di alterazione. Sulle foto, questo significa una maggiore riflettività, sia delle zone di distacco che degli accumuli corrispondenti. Le foto aeree osservate sono in bianco e nero; questa caratteristica permette un miglior contrasto nelle tonalità e quindi una più facile individuazione delle zone chiare. Per confermare il metodo di individuazione e per avere un'idea concreta di ciò che si osservava, alla fine di agosto 1999 è stata effettuata una spedizione di campagna; si sono percorsi un buon tratto della Val Nerina e la valle del fiume Corno fin quasi a Biselli, segnalando sulle ortofotocarte le frane osservate. Al ritorno si è potuta riscontrare una buona corrispondenza tra le osservazioni di campagna e quelle di fotointerpretazione.

Per ogni crollo si è individuata la zona di distacco e l'accumulo sottostante.

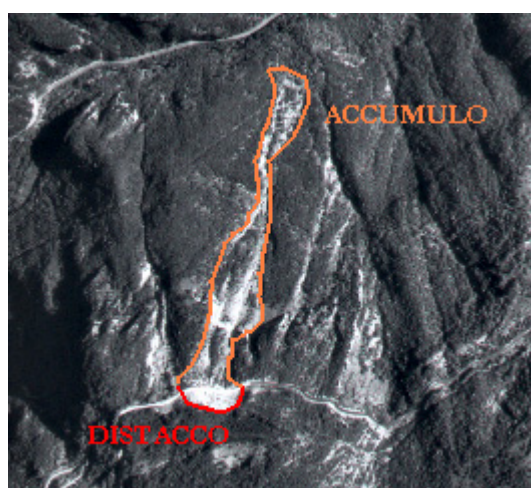


Fig.4.2 Individuazione delle zone di distacco e degli accumuli su una fotoaerea.

Inoltre sono state anche indicate alcune zone di distacco vicino alle quali non era visibile un accumulo pronunciato, quindi non si poteva essere sicuri della loro attività indotta dal

terremoto; in ogni caso sono state considerate potenzialmente franabili, per evidenti caratteristiche morfologiche.

Alcuni elementi hanno destato indecisione, perché in alcuni casi le frane potevano essere confuse con porzioni di versanti ripidi sotto l'azione dell'erosione; spesso l'indecisione è stata superata con un confronto con le ortofotocarte precedenti.

Altra difficoltà incontrata è stata l'osservazione di massi presenti sulle strade. Gli unici osservati erano nei pressi di Triponzo, prima della Balza Tagliata, individuati anche grazie alla conoscenza della loro presenza, dovuta al rilievo di campagna di 2 anni dopo.

Alla fine sono stati individuati poco meno di 200 fenomeni franosi, la cui maggioranza è rappresentata da crolli.

Il beneficio dato da questo lavoro deriva dall'osservazione completa di tutto il territorio in questione, potendo scoprire fenomeni non incontrati nelle campagne speditive effettuate sul campo appena dopo il terremoto; infatti esse ricoprono principalmente le zone percorribili in auto, attraverso le strade maggiori; considerando che la zona studiata è a carattere montuoso, si capisce come non sia stato possibile percorrerla interamente.

4.2.2 Individuazione dei danni agli edifici.

Rispetto al lavoro svolto per le frane, ricercare i danni agli edifici tramite fotointerpretazione presenta sostanzialmente due differenze: la prima riguarda il territorio osservato, la seconda il dettaglio dell'osservazione. Ovviamente l'indagine è stata centrata solamente ai centri abitati, anche se poi è stato possibile individuare abitazioni isolate sui colli o in mezzo alla vegetazione, attraverso un rapido sguardo d'insieme della particolare coppia di foto. Parlando delle difficoltà incontrate, è necessario notare che l'individuazione dei danni è definita da alcuni limiti oggettivi. Non bisogna dimenticare che le foto aeree sono riprese dall'alto e quindi di un abitato sono visibili soprattutto i tetti; ciò che non è possibile osservare sono i danni come crepature delle pareti o crollo parziale delle stesse, dove il tetto è rimasto intatto o quasi. Proprio per lo stesso motivo sono state stabilite 4 classi di danno:

1	Lievi danni al tetto
2	Gravi danni al tetto
3	Crollo parziale delle pareti, con crollo totale o parziale del tetto
4	Crollo totale

Tab.4.1 *Classi dei danni osservati.*

Le prime tre classi sono facilmente individuabili, mentre l'ultima crea dei problemi se il danno è veramente lieve da non essere visibile, oppure può essere confuso con le ombre create sui tetti dai comignoli. Oltretutto le ultime due classi sono le più sensibili rispetto la soggettività dell'operatore, essendo le distinzioni di tipo qualitativo.

L'area indagata ha compreso tutte le strisciate aeree inizialmente citate, in modo da avere una visione più completa della distribuzione dei danni e per poter unire questi dati ad altri rilevati precedentemente nella zona di Colfiorito.

I danni sono stati segnati su lucidi applicati alle foto attraverso punti di colore diverso, corrispondenti ognuno alle classi di danno.

4.2.3 Difficoltà incontrate nella fotointerpretazione.

L'osservazione delle foto ha riscontrato alcune difficoltà oggettive, derivanti sia dalle caratteristiche del territorio, sia da problematiche tecniche.

Le foto sono state scattate tutte nelle ore centrali della giornata, in modo da ridurre le ombre prodotte dagli oggetti presenti sul territorio. Nonostante questo accorgimento, le marcate incisioni vallive, ad esempio nella Val Nerina, hanno determinato delle ombre che investivano interi versanti; in questi siti all'ombra, l'informazione recepita è quasi nulla e solo in pochi casi è stato possibile intravedere aree leggermente meno scure, probabili accumuli di crolli. Solo col confronto dato dalle ortofotocarte si è potuto ipotizzare la presenza di frane, ma in alcuni casi si è preferito non esprimere un giudizio, data l'incertezza.

Siccome uno degli oggetti della rilevazione erano le scarpate in versanti ripidi, ha giocato un ruolo determinante il punto di vista della foto; infatti se la scarpata in questione si trovava al momento della foto proprio al di sotto dell'aereo, non è possibile vedere nella stessa foto il versante, perché subverticale e in linea con uno degli assi centrali del punto di vista. Una certa influenza il punto di vista l'ha avuta anche nel rilevare i danni agli edifici: infatti da certe angolazioni, i tetti delle case riflettevano troppo la luce solare, creando superfici omogeneamente chiare, in cui non era più possibile identificare i danni. A volte il problema è stato aggirato cercando, nella strisciata adiacente, delle foto che riprendessero i fabbricati da un'altra angolazione più favorevole.

4.3 Il modello digitale del terreno (DEM).

Il DEM (Digital Elevation Model) è una rappresentazione della topografia tramite un'immagine digitale, composta da una griglia regolare di pixels, ad ognuno dei quali è associato un valore che rappresenta la quota. Esso viene ottenuto dall'interpolazione delle curve di livello rasterizzate, dai punti quotati o da immagini satellitari.

Non disponendo di alcun DEM relativo all'area di studio, è stato necessario compiere interamente il percorso che porta alla creazione del modello.

4.3.1 Trasferimento delle curve di livello da supporto cartaceo a informatico.

Le curve di livello sono state ottenute da 8 ortofotocarte a scala 1:10000 della Regione Umbria, comprendenti una parte dei fogli 324 e 336 alla scala 1:50000.

Il primo passo da compiere è ottenere le curve di livello in modo che possano essere inserite in un computer per le successive elaborazioni.

Posizionando un foglio opaco indeformabile (di polietilene) sull'ortofotocarta, sono state disegnate tutte le curve di livello che era possibile tracciare; l'equidistanza tra le curve era di 10 m, ma in alcuni tratti è stato possibile solo disegnare quelle ogni 50 m di dislivello, in quanto troppo ravvicinate. Ciò è accettabile perché in questi tratti l'andamento delle curve era omogeneo, perciò la perdita di informazione è stata minima.

Una volta terminati gli otto fogli, è stato utilizzato uno scanner a rullo, creando dei files raster in formato *.tif.

4.3.2 Dalla georeferenziazione alla quotatura.

Con la georeferenziazione inizia l'utilizzo dei softwares che compongono i Sistemi Informativi Territoriali.

Il primo software utilizzato è stato Arc/Info. Attraverso la georeferenziazione, è possibile attribuire le coordinate alla mappa delle curve di livello scannerizzata; bisogna inserire le coordinate vere dei vertici della mappa. Unica attenzione che le coordinate vere e quelle calcolate dall'elaboratore abbiano un errore che nel caso in studio era accettabile se non superiore al metro.

Con il processo di vettorializzazione si passa dal formato raster a quello vettoriale

dell’Arc/Info, in modo che sia possibile ripulire la mappa per poi quotarla. Infatti si possono eliminare gli archi superflui, come le croci ai vertici o scritte di identificazione della carta. Inoltre è possibile smussare gli spigoli delle curve. Dopo aver eliminato gli pseudo nodi (nodi che si trovano nel mezzo di un arco), si deve aggiungere un campo alla tabella degli attributi, in modo da riempirlo successivamente con le quote.

La quotatura delle curve di livello è stata eseguita attraverso un programma ausiliare precostituito, digitato nel linguaggio utilizzato in Arc/Info.

Una volta quotate le 8 mappe disponibili, si è svolta l’operazione di unione delle mappe, in modo da far coincidere i nodi tra mappe adiacenti. Prendendo spunto dall’esperienza di una precedente realizzazione di un DEM (Carro, 2000), si è optato per l'utilizzo di algoritmi in Arc/Info, i quali risolvono i problemi al contatto di mappe con equidistanza differente.

Nelle fig.4.3 e 4.4 sono visualizzati il DEM risultante dalla procedura sopra descritta e quello risultante dall’applicazione del filtro “shadow” in Ilwis. Tale filtro simula una sorgente di luce che crea delle ombre nell’immagine, dando la sensazione della profondità e quindi del rilievo nel caso del DEM .

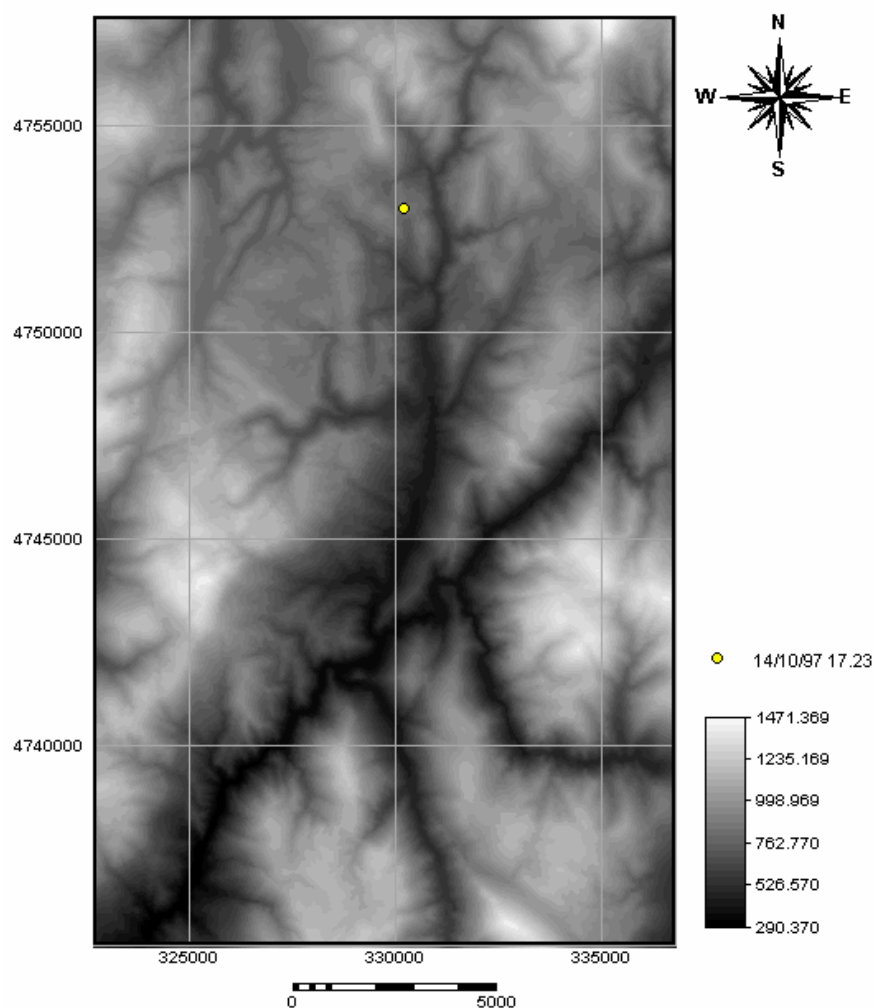


Fig.4.3 Modello digitale del terreno ottenuto in Arc/Info, tramite il comando “Topogridtool”.

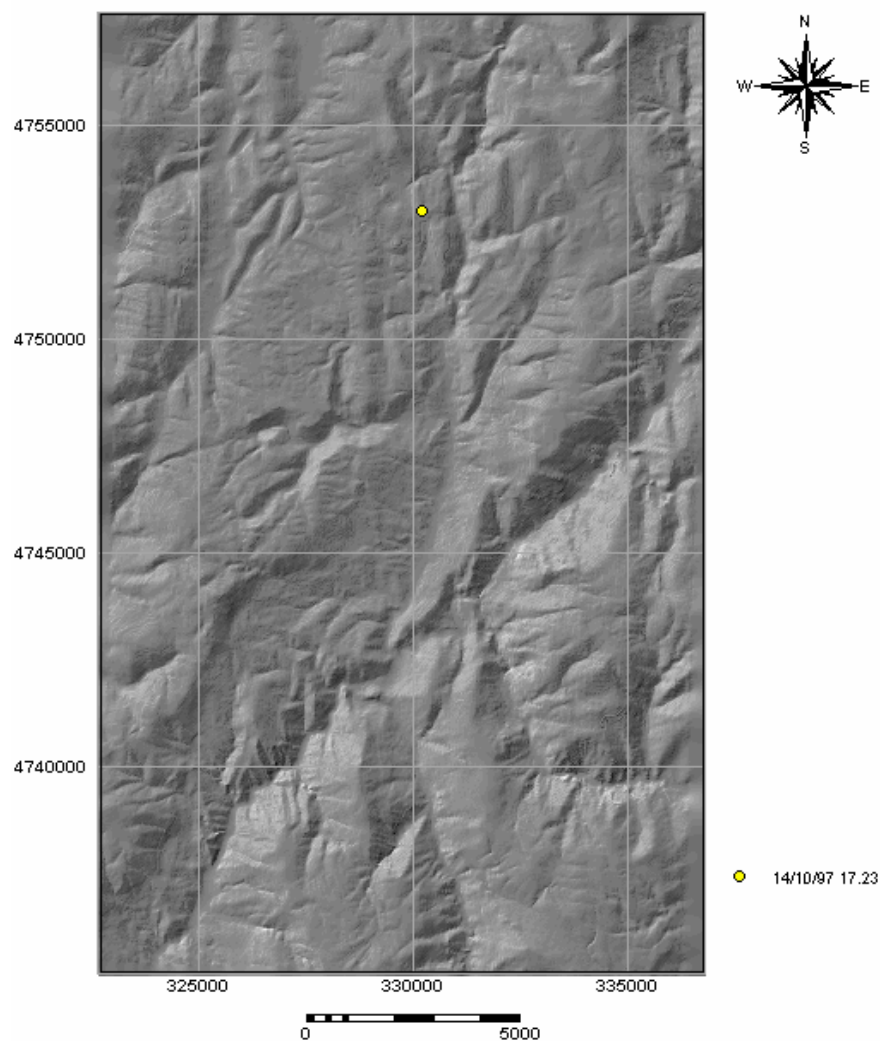


Fig. 4.4 Applicazione del filtro “shadow” in Ilwis, sull’immagine di fig.4.3. In giallo è indicato l’epicentro del 14 ottobre 1997.

La realizzazione del DEM col filtro “shadow”, ha messo in evidenza alcune imprecisioni dell’interpolazione, in alcuni punti in cui le curve originarie erano troppo vicine. Tali imprecisioni erano dell’ordine di pochi metri e quindi ben al di sotto del dettaglio originale. Comunque si è tentato di ovviare il problema realizzando un altro DEM con il filtro “average”, filtro che fa la media tra i valori di pixels adiacenti e riduce leggermente gli effetti dovuti alle curve di livello. Tali effetti sono stati evidenziati tramite l’istogramma dell’immagine, ponendo in ascissa il valore dei pixels e in ordinata il numero dei pixels: le frequenze maggiori risiedevano in corrispondenza dei valori delle curve di livello, visualizzate dai picchi dell’istogramma. Nella pratica il filtro “average” è una griglia, ad

esempio 3x3, contenente celle con valori 1; tale griglia scorre sull'immagine e passo per passo moltiplica i valori dei pixels per il valore delle sue celle; i prodotti ottenuti vengono sommati e divisi per il numero di celle (nell'esempio fatto sono 9), eseguendone la media aritmetica.

Questa operazione comunque non ha dato risultati rilevanti e vista la poca importanza dell'errore è stato mantenuto il DEM primario.

4.4 Digitalizzazione delle mappe.

4.4.1 La mappa geologica.

La realizzazione della mappa geologica in formato digitale ha comportato alcuni problemi derivanti dal fatto che non è disponibile una cartografia geologica di dettaglio; l'area compresa nelle 8 ortofotocarte, utilizzate per la realizzazione del DTM, era ricoperta da sole 4 carte geologiche al 10000, appartenenti al "Progetto carta geologica della Val Nerina" della Regione Umbria, derivanti da rilevamenti degli anni ottanta. Per ricoprire l'intera area di studio, l'unica possibilità era integrarli con i fogli geologici 131 Foligno e 132 Norcia, cioè carte al 100000.

Per digitalizzare le 4 carte geologiche al 10000 si è utilizzata una tavoletta digitalizzatrice. Questo strumento è composto da una tavoletta e da un mouse fornito di tastiera. Lo stesso mouse ha la caratteristica di possedere un puntatore che permette di localizzare esattamente la posizione sulla tavoletta. Con il supporto di Ilwis, il digitalizzatore ha permesso un diretto trasferimento dei contorni delle carte geologiche dal formato cartaceo a quello digitale. Inoltre a ogni file creato è stato associato lo stesso domain, contenente i codici dei segmenti, divisi in tre classi:

Codice	Classe
1	Limite stratigrafico
2	Faglia/limite stratigrafico
3	Faglia

Tab.4.2 codici degli archi della mappa vettoriale della geologia.

Una volta mappati tutti i segmenti di una carta, bisogna creare da essi i poligoni che rappresenteranno le formazioni geologiche.

Le 4 mappe sono state raggruppate in un unico file, sul quale si è agito unendo i nodi ai margini delle originarie mappe. Nelle classi dei segmenti, la terza classe “faglia” non riguarda i contorni delle formazioni geologiche; perciò con un’altra operazione sono state estratte solo le altre due classi in modo da ottenere esclusivamente i contorni delle formazioni.

Inizialmente si sono controllati i segmenti in modo da non avere intersezioni.

Per ottenere dei poligoni da segmenti, condizione necessaria è che la mappa generale non abbia terminazioni isolate e che quindi ogni nodo finisca in un altro nodo.

Alla fine resta solo da poligonizzare la mappa; Ilwis crea i poligoni a partire dai segmenti, chiedendo di associarvi un domain: nel caso è stato associato un domain contenente tutte le sigle delle formazioni geologiche relative alla successione umbro-marchigiana. Cliccando su ognuno dei poligoni, si assegna la sigla corrispondente, aiutandosi con la carta geologica. Per non dover riniziare da capo quest’ultima operazione in caso di errore, è stata creata una mappa di “labels”, cioè punti identificativi di ogni poligono, con i loro rispettivi attributi, detti centroidi dei poligoni; infatti man mano che si assegnava l’attributo al poligono, automaticamente si generava la labels associata; commettendo un errore di assegnazione, si poteva ricreare la mappa di poligoni partendo dai segmenti e dai centroidi.

Non essendo disponibili alcune carte al 10000, si è fatto in modo di ricoprire l’area scoperta con i fogli geologici al 100000. La loro digitalizzazione è avvenuta in modo analogo a quella descritta precedentemente per le curve di livello; infatti per questo si è utilizzato ancora una volta Arc/Info per georeferenziare e vettorializzare il file derivante dalla scannerizzazione dei limiti stratigrafici.

La diversa scala di origine dei dati ha inciso anche sull’assegnazione dei nomi delle formazioni geologiche ai poligoni: infatti il numero di formazioni al 10000 è maggiore che al 100000, per il maggior dettaglio. Si è accorpata la voce ‘Sv’ nella ‘Sc’ e le voci ‘MS’, ‘CP’ nella voce ‘RA’. Nella mappa risultavano quindi dei poligoni adiacenti con lo stesso attributo i quali sono stati accorpati in un unico poligono.

Nel digitalizzare le carte geologiche al 100000, non erano stati considerati i limiti delle alluvioni recenti dei fondi valle, per la difficoltà pratica di disegnarli sul foglio da scannerizzare. Questo vuoto di informazione è stato riempito tramite un successivo lavoro di fotointerpretazione, volto a riconoscere non solo le alluvioni ma anche gli eventuali grossi accumuli di detrito di versante. Per questi ultimi si sono ricercate mappe geologiche di dettaglio di alcuni rilevamenti di microzonazione sismica, ma le uniche zone interessanti per lo studio sono state quelle delle località di Forfi e Pupaggi.

Una volta riportati i limiti sulle ortofotocarte e poi digitalizzati con il digitalizzatore, si è prodotta la carta poligonale dei depositi, i quali sono stati confrontati con alcuni già presenti nella mappa al centomila e con la topografia delle curve di livello digitalizzate. Questo ha permesso alcune correzioni dei limiti, oltre che verificare l'attendibilità del dettaglio della mappa al 100000: i depositi della suddetta erano coerenti con la topografia.

Modificando i segmenti della mappa geologica si sono potuti inserire quelli dei depositi, per poi generare la definitiva mappa totale corretta, ottenendo la mappa presentata nel primo capitolo.

4.4.2 La mappa delle frane.

Come spiegato all'inizio del capitolo, le frane rilevate dalla fotointerpretazione sono state riportate sulle ortofotocarte; trattandosi di crolli, sono state segnalate le zone di distacco e gli accumuli. Sono state scelte quattro classi per la rappresentazione, desunte dalle caratteristiche delle frane rilevate:

Codice	Classe
1	Zona di distacco
2	Zona di distacco confinante con l'accumulo
3	Zona di probabile distacco
4	Accumulo

Tab.4.3 Codici della mappa vettoriale relativa alle frane.

Con queste semplici distinzioni, una volta digitalizzate tutte le informazioni, è stato possibile realizzare altre due mappe; la prima mappa conteneva solo le zone di distacco, elemento fondamentale per il successivo studio; la seconda mappa riguardava solo gli accumuli, necessaria per eventuali elaborazioni statistiche. La mappa degli accumuli è stata poligonizzata, generando un domain di tipo "identifier"; in pratica ogni classe del domain viene associata ad un unico elemento della mappa, in modo da assegnare ad ogni accumulo il numero progressivo delle frane rilevate.

La maggior parte dei crolli rilevati era composta sia da una zona di distacco che dal relativo accumulo. Siccome gli accumuli possedevano un numero specifico, si è pensato di assegnare un nuovo campo alla tabella degli attributi delle zone di distacco, per far sì che un accumulo potesse essere associato alla corrispondente zona di distacco.

Terminata questa operazione, la mappa delle frane era pronta per le elaborazioni, come si può osservare nelle fig.4.5 e 4.6.

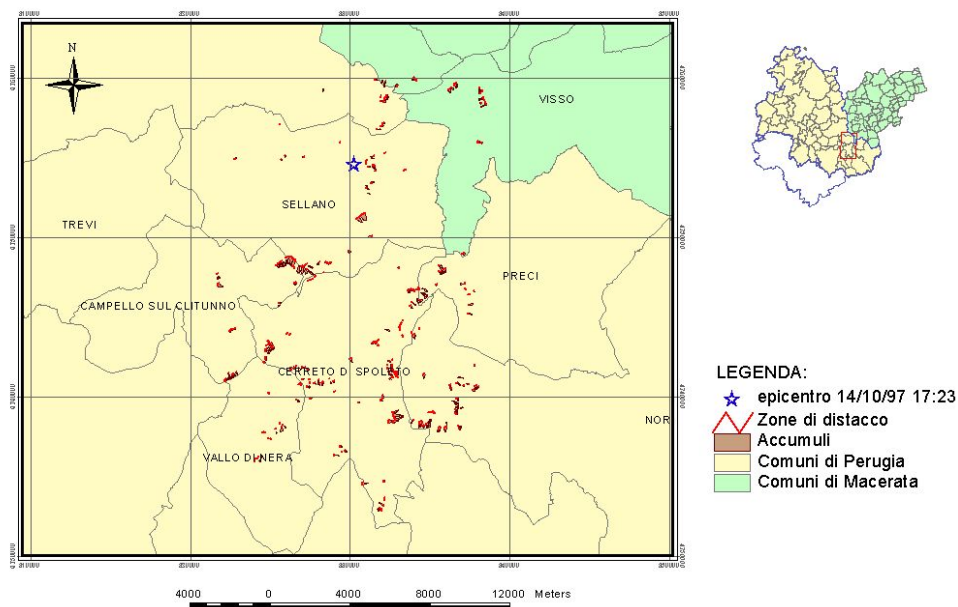


Fig.4.5 Mappa delle frane osservate nell'area di studio.

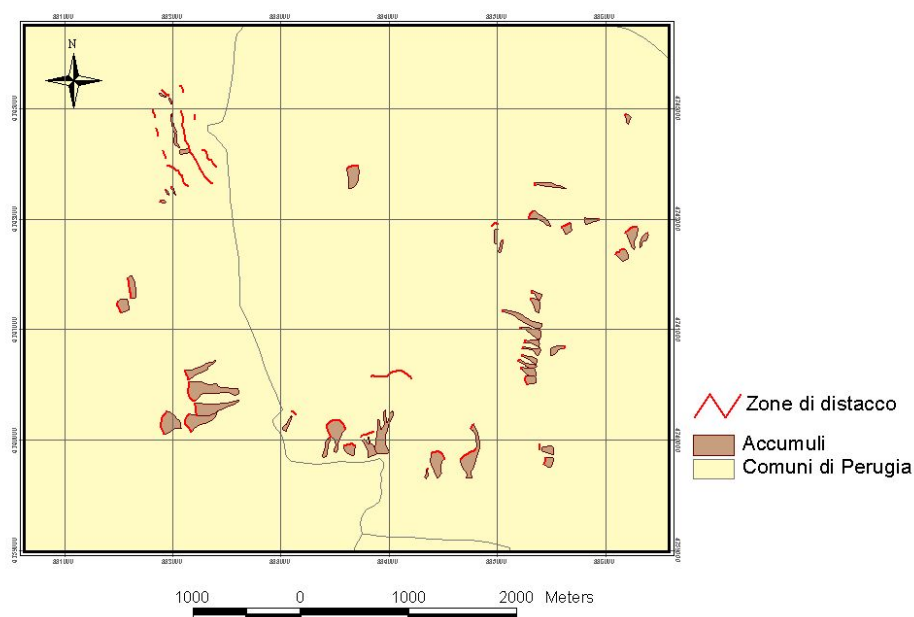


Fig.4.6 Particolare della mappa delle frane.

4.4.3 La mappa dei danni agli edifici.

La mappa dei danni è quella che ha presentato meno difficoltà nella digitalizzazione, in quanto essa è semplicemente una mappa di punti, indicanti la posizione e l'entità del danno.

Le classi di danno inserite sono quelle già descritte precedentemente.

Il tempo necessario per l'operazione è stato oggettivamente esiguo e questo fa ben capire come in breve siano disponibili dati da utilizzare in previsione di una gestione del territorio indirizzata verso la pianificazione degli interventi.

La mappa risultante, unita con quella relativa ad altri rilevamenti, è visualizzata in Fig.4.7.

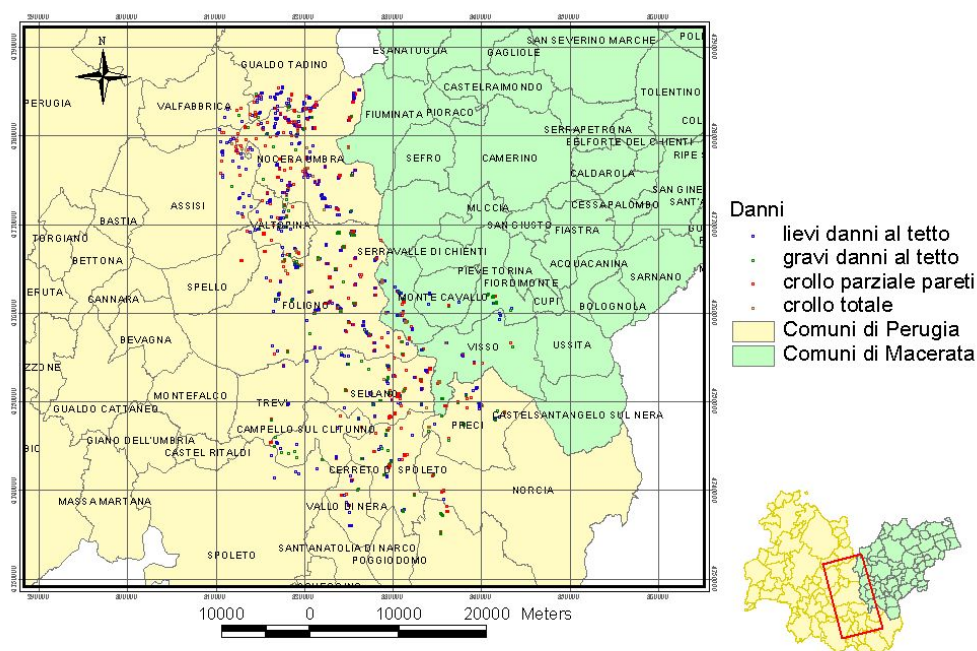


Fig.4.7 Mappa dei danni osservati nell'area di studio.

CAPITOLO V

Frane indotte dal terremoto

5.1 Ricorrenza dei tipi di frane durante un evento sismico.

5.1.1 Classificazione delle frane indotte dal terremoto.

Gli studi inerenti alle frane indotte da un terremoto sono progrediti sostanzialmente circa una trentina di anni fa; l'importanza di questo argomento risiede nel fatto che potenti movimenti tellurici hanno la capacità di incrementare il pericolo di frane in zone particolarmente suscettibili del territorio. La necessità di capire quanto e come i terremoti indurrebbero movimenti di versante deriva dalle catastrofi avvenute nel passato, le quali hanno drasticamente interagito con l'uomo. Infatti molte relazioni e studi scientifici hanno preso il via con la descrizione della valanga di rocce del Nevado Huascarán; il 31 maggio 1970 un terremoto di magnitudo 7.7, con epicentro a 130 km al largo della costa del Perù, ha causato una massiccia valanga di rocce nella Cordillera Blanca delle Ande Peruviane; un volume stimato di 50-100 milioni di metri cubi di detriti ha viaggiato per 16 km, raggiungendo le città di Ranrahirca e Yungay, causando la morte di 18 mila persone. Altri lavori hanno riguardato eventi molto antichi, come quelli studiati da Li nell'area cinese; la frana che causò 760 vittime a Wudu, nel centro della Cina, risalente al 1789 a.c., è probabilmente la più vecchia frana di umana memoria causata da un sisma; da ricordare anche il terremoto del 1718 d.c., responsabile di frane in loess che colpirono oltre 40 mila vite. Più vicino alla nostra realtà è ciò che capitò in Calabria nel 1783 (Cotecchia, 1987): numerose ed estese frane spazzarono via interi paesi, trasportati con esse nei fondovalle, con la concomitante formazione di 215 laghi. Nel 1920 il terremoto di Haiyuan, sempre in Cina, causò 675 grandi frane in detriti eolici, creando 40 laghi, dei quali 27 esistono ancor oggi, determinando almeno la metà delle 200 mila vittime che risultarono dallo stesso sisma.

Gli esempi sopra citati sono solamente una parziale lista di tutti i terremoti che hanno prodotto delle frane distruttive per le opere umane e letali per l'uomo stesso.

Le frane indotte da un terremoto ricadono in zone che comprendono una varietà di materiali e condizioni topografiche. Gli studi inerenti si indirizzano verso due strade differenti: la prima riguarda l'analisi di una o di un gruppo di poche frane, valutando in dettaglio l'instabilità dei versanti; la seconda si interessa della distribuzione areale delle frane e quindi è uno studio a scala regionale. Proprio considerando quest'ultimo aspetto, si evince l'utilità di evidenziare le forme dominanti di frane da utilizzare nelle mappature e nei programmi di ricostruzione dopo un disastro.

Analizzando una quarantina di terremoti storici negli Stati Uniti, nel 1984 Keefer pubblica una classificazione di frane indotte da un sisma, composta da 14 classi; i parametri considerati sono: tipo di movimento, tipo di materiale, velocità del movimento e la topografia. Tale classificazione prende spunto da quella di Varnes (1978). I sei tipi di movimento inclusi sono: crolli, ribaltamenti, scivolamenti, espandimenti laterali, flussi e movimenti complessi.

Di seguito viene descritta nel dettaglio la classificazione.

Categoria 1.

Sono compresi crolli, scivolamenti traslazionali in roccia o terreno e valanghe di roccia o di terreno. Storicamente tali frane possono essere distruttive e viaggiare da moderate ad alte velocità; si ritrovano su ripidi versanti e originano da sforzi tensionali e di taglio, in materiali saturi o secchi.

I crolli in roccia sono macigni singoli o masse distrutte di roccia che discendono il versante in caduta libera, rimbalzando e rotolando. Le caratteristiche dei materiali coinvolti in crolli e scivolamenti in roccia sono forte cementazione e alto grado di alterazione o fratturazione. Wilson e Keefer (1989) hanno sviluppato un metodo di stima della suscettibilità a tali frane su versanti di pendenza intorno a 35°. Mentre per quel che riguarda le valanghe di roccia, Keefer (1984) ha procurato criteri topografici e geologici per riconoscere le probabili sorgenti di questi eventi: fratture ben spaziate, moderata o intensa alterazione, piani di debolezza, debole cementazione e evidenze di precedenti rotture.

Gli scivolamenti e le valanghe di terreno sono frequenti in terreni limosi o sabbiosi di bassa plasticità, leggermente cementati, fortemente fratturati, su versanti più ripidi di 25°.

Categoria 2.

Le frane qui comprese si muovono primariamente su superfici di taglio e possono essere valutate analiticamente utilizzando metodi analitici. I dati necessari per applicare le analisi sono i parametri della resistenza al taglio del materiale, la pendenza, la localizzazione della potenziale superficie di taglio, la pressione dell'acqua nei pori e lo scuotimento sismico atteso. Le frane prese in considerazione riguardano scivolamenti traslazionali e rotazionali in roccia e terreno e lenti flussi di terreno.

Gli scivolamenti rotazionali in roccia e gli scivolamenti traslazionali in blocchi di roccia sono generalmente meno comuni che i crolli in roccia. La maggior parte si ritrovano su versanti resi più ripidi dall'erosione fluviale o costiera, dall'erosione glaciale, da

trinceramenti artificiali o da attività vulcanica; le pendenze comprese vanno dai 15° ai 25°. Scivolamenti e flussi di terreno sono frequenti in due ambienti geologici: su piane alluvionali o costiere, con pendenze dolci; ma maggiormente su limi non cementati o sabbie con vicina falda acquifera, argille o limi argillosi, aventi pendenze comprese tra i 6 e i 35 gradi. Spesso si ritrovano in depositi colluviali, glaciali o ceneri vulcaniche.

Categoria 3.

In questa sezione vengono compresi gli espandimenti laterali, i flussi rapidi di terreno e le frane subacquee. Esse sono tipicamente il risultato della liquefazione del terreno causata da un momentaneo accrescimento della pressione dell'acqua nei pori in materiali saturi.

Sabbie e limi saturi e vagamente impaccati sono i materiali più comuni per gli espandimenti laterali. Mentre loess e materiali vulcanici alterati intercalati con ceneri sono suscettibili di rapidi flussi. Questi movimenti si originano in pendenze anche molto lievi, comunemente intorno ai 15°.

TIPO DI MOVIMENTO	Distruzione interna	Contenuto d'acqua	Velocità	Profondità
Categoria 1				
Rock falls	Elevata o molto elevata	Da secco a bagnato	Estremamente rapido	Poco profondo
Rock slides	Elevata	Da secco a bagnato	Da rapido a estremamente rapido	Poco profondo
Rock avalanches	Molto elevata	Da secco a bagnato	Estremamente rapido	Profondo
Soil falls	Elevata	Da secco a bagnato	Estremamente rapido	Poco profondo
Soil slides	Elevata	Da secco a bagnato	Da moderato a rapido	Poco profondo
TIPO DI MOVIMENTO	Distruzione interna	Contenuto d'acqua	Velocità	Profondità
Soil avalanches	Molto elevata	Da secco a bagnato	Da molto rapido a estremamente rapido	Poco profondo

Tab.5.1 Classificazione delle frane indotte da un terremoto (Keefer 1984; Wilson e Keefer 1989)

Categoria 2				
Rock slumps	Lieve o moderata	Da umido a bagnato	Da lento a rapido	Profondo
Rock block slides	Lieve o moderata	Da umido a bagnato	Da lento a rapido	Profondo
Soil slumps	Lieve o moderata	Da secco a umido	Da lento a rapido	Profondo
Soil block slides	lieve a moderata	Da secco a umido	Da lento a molto rapido	Profondo
Slow earth	Lieve	Da bagnato a molto bagnato	Da molto lento a moderato	Variabile
Categoria 3				
Soil lateral spreads	Generalmente moderata occasionalmente lieve o elevata	Bagnato	Molto rapido	Variabile
Rapid soil flows	Molto elevata	Bagnato	Molto rapido	Variabile
Subaqueous landslides	Generalmente elevata occasionalmente moderata	Da bagnato a molto bagnato	Da rapido a estremamente rapido	Profondo

(continua Tab.5.1)

Note alla Tab.5.1:

Distruzione interna: **lieve**, la frana è composta da uno o pochi blocchi coerenti; **moderata**, la frana è composta di molti blocchi coerenti; **elevata**, la frana è composta di numerosi piccoli blocchi, granuli singoli di terreno e frammenti di roccia; **molto elevata**, la frana è quasi completamente disaggregata in granuli di terreno e frammenti di roccia.

Contenuto d'acqua: **secco**, umidità non visibile; **umido**, non si trova acqua libera e il comportamento può essere quello di un solido plastico ma non di un liquido; **bagnato**, acqua libera comportamento in parte come un liquido; **molto bagnato**, comportamento da liquido anche sotto un basso gradiente (da Varnes,1978).

Velocità: **estremamente lento**, minore di 0.6 m/a; **molto lento**, tra 0.6 m/a e 1.5 m/a; **lento**, tra 1.5 m/a e 1.5 m/mese; **moderato**, tra 1.5 m/mese e 1.5 m/giorno; **rapido**, tra 1.5 m/giorno e 0.3 m/min; **molto rapido**, tra 0.3 m/min e 3 m/s; **estremamente rapido**, più di 3 m/s (da Varnes,1978).

Profondità: **poco profondo**, generalmente meno di 3 m; **profondo**, generalmente più di 3 m

5.1.2 Frequenza delle frane in terremoti storici.

Il pericolo rappresentato dalle frane indotte dal terremoto dipende dalla loro potenziale quantità, dal tipo di movimento e dalla distribuzione della popolazione e delle costruzioni umane.

Utilizzando la classificazione descritta nel precedente paragrafo, Keefer (1984) ha determinato il numero probabile dei differenti tipi di frane indotte da un sisma, riferendosi ad un campione di 40 terremoti storici. Tutti i tipi di frane considerate sono potenzialmente pericolose per la vite umane e almeno il 90% delle frane ha causato vittime nei terremoti storici, risultanti da valanghe di roccia, flussi rapidi di terreno e crolli di roccia.

Valanghe di roccia e colate rapide di terreno, i due principali tipi che causano distruzione, sono simili per la loro capacità di viaggiare anche per vari chilometri ad alte velocità, su lievi pendenze. La maggior parte delle morti causate da queste frane risultano dal seppellimento di paesi o città distanti chilometri dalla sorgente del movimento. Esse sono relativamente non comuni nei terremoti storici mondiali e solo pochi casi sono ricordati nei terremoti studiati da Keefer; comunque anche una singola valanga di roccia o un singolo colamento possono causare danni catastrofici. I colamenti sono comuni in quelle regioni nelle quali piove abbondantemente per lunghi periodi.

I crolli in roccia, la terza causa di forte distruzione, sono il tipo di frana più comune in un terremoto e teoricamente si ritrovano in ogni tipo di roccia su versanti ripidi oltre i 40°. L'area a rischio di crolli è limitata alla zona che può essere raggiunta dal materiale che si distacca, quando esso raggiunge la base del versante e rotola a valle.

Le altre frane indotte da terremoti che possono causare ingenti danni, in aggiunta alle sopracitate, sono gli scivolamenti e gli espandimenti laterali. La loro propensione a causare danni è dovuta al fatto che esse sono frequenti su pendii meno ripidi dove comunemente esistono insediamenti umani.

TIPO DI FRANA	Rock falls, disrupted soil slides, rock slides	Soil lateral spreads, soil slumps, soil block slides, soil avalanche	Soil falls rapid soil flow, rock slumps	Subaqueous landslides, slow earth flow, rock block slides, rock avalanches
FREQUENZA	Molto frequenti >100000	Frequenti da 10000 a 100000	Moderatamente comuni da 1000 a 10000	Non comuni da 100 a 1000

Tab.5.2 Frequenza delle frane indotte da un terremoto

5.2 Modelli numerici per le frane indotte da un terremoto.

Se un particolare versante si muove durante un terremoto dipende da due fattori: quanto era stabile il versante prima del terremoto e quanto violentemente il terremoto lo ha scosso. Quindi, per comparare la stabilità del versante prima del terremoto e l'intensità dello stesso bisognerà esprimerle numericamente nella stessa unità dimensionale.

Nei paragrafi successivi si descriveranno i lavori di letteratura che descrivono come misurare la stabilità dei versanti, l'intensità delle scosse sismiche e le relazioni intercorrenti tra la magnitudo dei terremoti e la distanza dalla sorgente sismica.

5.2.1 Meccanica della stabilità dei versanti.

L'analisi della stabilità dei versanti comincia considerando le condizioni statiche e cioè asismiche. Si ipotizza e schematizza che la frana sia uno scivolamento in blocco. Nel centro di massa della frana agiscono due forze contrapposte, dirette lungo la pendenza del versante: la componente parallela al versante del carico gravitazionale (L) e la forza di resistenza (R), la quale si oppone al movimento verso il basso della massa considerata. La resistenza massima (R_{\max}) può essere espressa come l'integrazione della forza di taglio sull'area franabile. La stabilità statica del versante si può rappresentare numericamente attraverso il fattore di sicurezza (FS), cioè il rapporto tra la resistenza massima e il carico agente sul versante:

$$FS = R_{\max} / L$$

Se FS è maggiore di 1 allora il versante è in condizioni stabili; se $FS = 1$ si ha un equilibrio instabile.

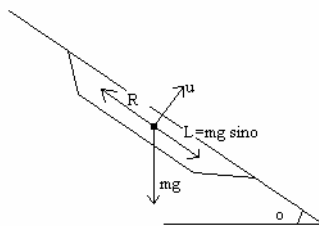


Fig.5.1 Forze che agiscono su di un versante.

Il passo successivo è considerare le condizioni dinamiche, quando interviene un input sismico.

Durante un terremoto, le onde sismiche inducono sul versante un campo di accelerazione $a(t)$, il quale esercita una forza addizionale sulla massa della potenziale frana. Lungo l'intervallo di tempo in cui agisce la scossa, la forza sismica indotta fluttuerà e sporadicamente si aggiungerà al carico lungo il versante. Se tale forza è abbastanza grande, il carico totale ($L + u$), dove $u = m a(t)$, può eccedere la massima resistenza e il versante si sposterà verso il basso irreversibilmente ($FS < 1$).

Wilson e Keefer (1983) hanno espresso il livello di movimento del terreno in termini di accelerazione critica (A_c); essa è quell'accelerazione sismica che moltiplicata per la massa dà la differenza tra la massima resistenza e il carico.

$$mA_c = R_{\max} - L$$

Dopo alcuni semplici passaggi matematici si arriva a definire l'accelerazione critica come:

$$A_c = (FS - 1) g \sin \sigma$$

dove g è l'accelerazione di gravità e σ è l'angolo della pendenza. Bassi valori di accelerazione critica danno un'alta suscettibilità e viceversa.

L'accelerazione critica è perciò la minima accelerazione richiesta per superare il massimo della resistenza del versante a franare.

Se si conoscono la ripidità del versante e le proprietà dei materiali dello stesso, si può stimare l'accelerazione critica di una frana poco profonda su un versante ipoteticamente infinito:

$$A_c/g = c'/h\gamma + (1-\lambda) \tan \varnothing' \cos \sigma - \sin \sigma$$

Con γ peso specifico del materiale, h lo spessore della potenziale frana, c' la coesione effettiva, \varnothing' l'angolo di attrito e λ un parametro riferito alla pressione dell'acqua nei pori.

In tal modo si può rendere in un grafico la relazione tra A_c e la pendenza del versante per ogni categoria di materiali. Da tale grafico si può capire attraverso le combinazioni pendenza-litologia la suscettibilità alle frane indotte dalla sismicità, riferendosi alla relativa accelerazione critica (Fig.5.2).

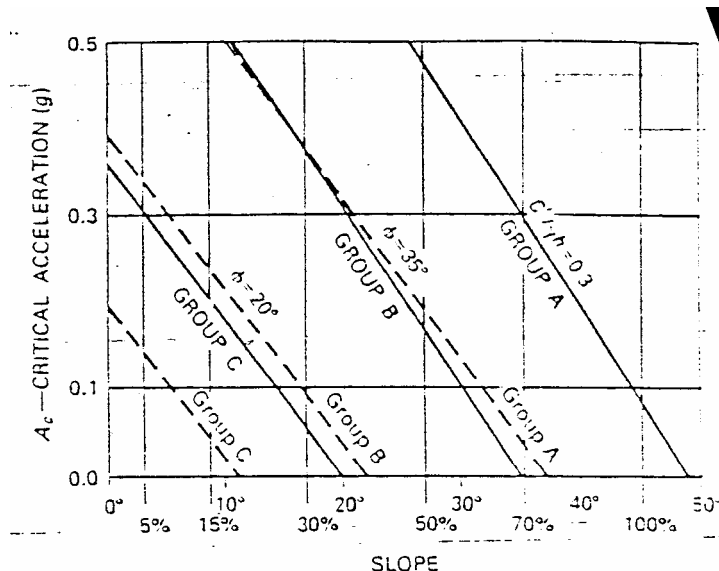


FIGURE 169.—Plots of critical acceleration (A_c) versus slope steepness for three sets of lithologies: group A, strongly cemented rocks (crystalline rock and well-cemented sandstone); group B, weakly cemented rocks (sandy soil and poorly cemented sandstone); group C, argillaceous rocks (clayey soil and shale). The cohesion factor, $c/\gamma h$, for group A assumes values of $c = 300$ psf, $\gamma = 100$ pcf, and $h = 10$ ft. The angle of internal friction (ϕ) (peak strength, undrained conditions) is 35° for sands, sandstone, and crystalline rocks and 20° for clayey soils and shales. The solid lines depict dry slope materials, and the dashed lines depict saturation from the slide plane to the surface.

Fig.5.2 Da R.C. Wilson and D.K. Keefer, , "Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region – An Earth – Science perspective", 1985.

5.2.2 Analisi di Newmark.

L'accelerazione critica rappresenta il movimento necessario per iniziare i meccanismi di rottura del versante. Spesso piccoli movimenti non hanno un significato pratico e non causano problemi effettivi; ma, d'altra parte, se il movimento supera certi valori, un versante può destabilizzarsi fino a produrre una frana. Quindi sarebbe importante conoscere quanto una parte di versante può muoversi senza creare una frana significativa.

Questo spostamento può essere studiato utilizzando le tecniche sviluppate da Newmark (1965). Tale metodo utilizza un record di accelerazione del terreno rispetto al tempo per calcolare lo spostamento atteso del blocco rigido sul versante, considerato come potenziale frana. Esso è applicabile direttamente a scivolamenti traslazionali coerenti e a quelli rotazionali con alcune modifiche; inoltre se si inseriscono nel calcolo altri parametri che rappresentano le rotture tensionali e il comportamento fragile, il modello può anche essere applicato a frane disaggregate. Comunque la sola limitata applicabilità riguarda le

liquefazioni indotte da espandimenti laterali e i colamenti.

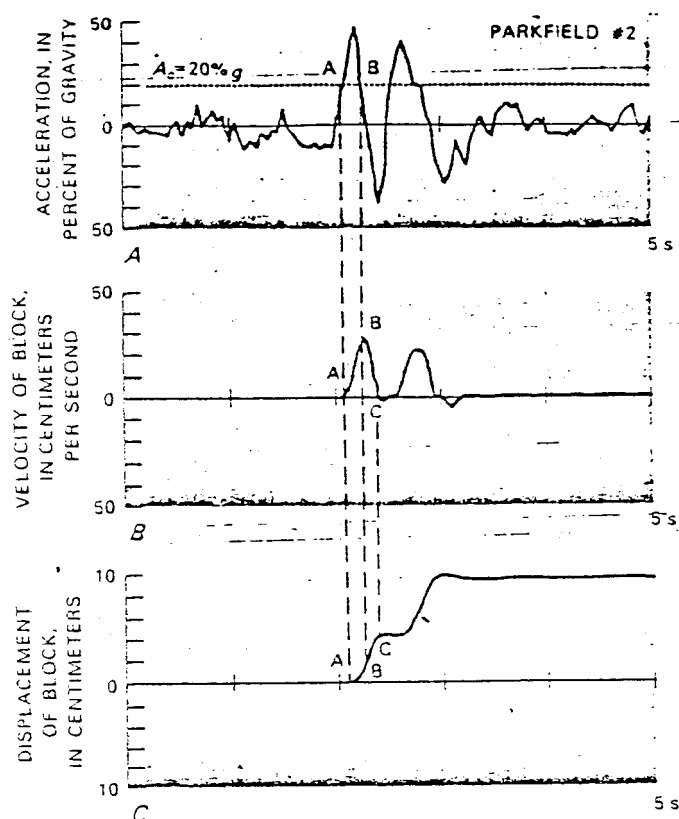


Fig.5.3 Significato dell'accelerazione critica (spiegazioni nel testo); da R.C. Wilson and D.K. Keefer, , "Evaluating earthquake hazards in the LosAngeles region – An Earth – Science perspective", 1985.

La fig.5.3 descrive l'accelerazione nel tempo durante un ipotetico evento sismico; sovrapposta con una linea orizzontale si trova l'accelerazione critica per un dato versante. Finché il picco di accelerazione si mantiene al di sotto dell'accelerazione critica, il versante rimane nella sua posizione stabile; se il picco la eccede, bisogna integrare la porzione di record che sta al di sopra dell'accelerazione critica stessa. L'integrazione rispetto al tempo, permette di determinare la velocità del blocco del versante. Dopo aver raggiunto la massima velocità, il blocco passa al di sotto dell'accelerazione critica e decelera sotto l'azione dell'attrito col versante sottostante, fino a fermarsi. Lo spostamento del blocco è calcolato integrando, sempre rispetto al tempo, la velocità.

Conoscendo i materiali di uno specifico versante, si potrebbe stimare la perdita di forza rispetto alle deformazioni che subisce il versante, cioè il decrescere dell'accelerazione critica, in funzione dello spostamento. Goodman e Seed (1966), per esempio, compiono degli esperimenti di laboratorio su sabbie non cementate; ovviamente questa analisi è ristretta ad un singolo versante di cui si conoscano bene le proprietà meccaniche. Per

un'applicazione a scala regionale, come una mappatura di suscettibilità, non è pratico e facile attualizzare tale metodo. Oltretutto, l'analisi numerica comprende l'assunzione di un valore costante dell'accelerazione critica, anche se durante il movimento probabilmente il versante subisce delle variazioni nei suoi valori di stabilità. Lo spostamento calcolato è comparato con un valore detto spostamento critico, oltre il quale il versante può irrimediabilmente muoversi. Il valore effettivo dello spostamento critico dipende dai meccanismi di rottura del versante (crolli, scivolamenti, ecc.), dalla litologia, dalla geometria del versante e dalla precedente storia del movimento su quel versante. Da questo concetto si è arrivati ad assegnare per frane coerenti un valore di spostamento critico di 10 cm; per i crolli e molte altre frane in roccia disaggregata, con importante componente di rottura tensionale e comportamento fragile, lo spostamento critico è basso, è stato assunto un valore di 2 cm.

L'analisi di Newmark è stata utilizzata nei lavori di Keefer e Wilson (1983) e da Wieczorek e altri (1985).

5.2.3 Relazione tra la violenza dello scuotimento e la stabilità dei versanti.

Nei precedenti paragrafi si è visto che la stabilità di un versante prima di un evento sismico può essere espressa attraverso l'accelerazione critica, come funzione della pendenza e delle proprietà dei materiali. Inoltre con l'analisi di Newmark si è arrivati a calcolare lo spostamento critico per un versante avente una determinata accelerazione critica, utilizzando record di accelerazioni durante le scosse sismiche.

Il passo successivo è la descrizione della violenza del sisma utilizzando un unico numero, indipendente dalla stabilità di qualche singolo versante, ma esprimendolo nella stessa unità di misura, l'accelerazione, in modo da poter compararlo direttamente alla stabilità.

Ripetendo l'analisi di Newmark per una famiglia di accelerazioni critiche, da zero fino al picco di accelerazione del record di movimento, si può prevedere uno spostamento per ogni valore di accelerazione critica. In questo modo, è possibile determinare la risposta di ogni possibile versante rispetto al movimento sismico rappresentato dal record; questo procedimento è analogo allo "spettro di risposta" utilizzato nelle valutazioni ingegneristiche per gli edifici antisismici.

Se si riporta in un grafico lo spostamento atteso rispetto l'accelerazione critica, per diversi record sismici, si ottiene ad esempio quello che è raffigurato nella fig.5.4.

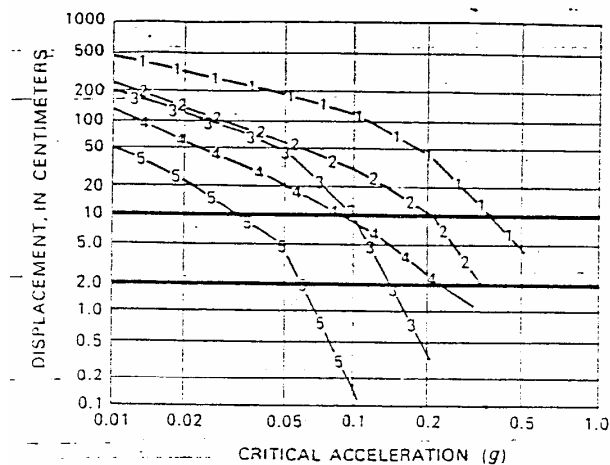


FIGURE 171.—Displacements predicted by the Newmark analysis as a function of assumed critical acceleration for several strong-motion records from California earthquakes. The stronger of the two horizontal components of the records was used in each case. Also indicated for reference are the values of critical displacement for coherent landslides (slumps, block slides, and earth flows) (10 cm) and for disrupted landslides (falls, slides, and avalanches) (2 cm). 1, S. 16° E. component of horizontal ground motion recorded at Pacouma damsite from the 1971 San Fernando earthquake; 2, 1966 Parkfield earthquake, station 2; 3, 1940 El Centro earthquake; 4, 1966 Parkfield earthquake, station 5; 5, 1952 Taft earthquake.

Fig.5.4 Spostamento atteso dall'analisi di Newmark; R.C. Wilson and D.K. Keefer, "Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region – An Earth – Science perspective", 1985.

Considerando l'accelerazione critica corrispondente agli spostamenti critici di 10 e 2 cm per ogni record, si ottengono i valori di $(A_c)_{10}$ e di $(A_c)_2$, misure della violenza dello scuotimento, direttamente legate alla stabilità dei versanti.

$L'(A_c)_{10}$ e $L'(A_c)_2$ determinano il vantaggio suddetto di unire nella stessa unità fisica la scossa del terremoto con la stabilità dei versanti. $L'(A_c)_{10}$ dà l'accelerazione critica maggiore per i versanti suscettibili a frane coerenti; tutti i versanti che hanno $A_c > (A_c)_{10}$ possono sopravvivere alla scossa sismica senza subire spostamenti significativi. Analogamente vale per le frane di crollo o disaggregate per cui lo spostamento critico è 2 cm. Quindi $(A_c)_{10}$ e $(A_c)_2$ diventano parametri adatti ad esprimere la violenza sismica per prevedere le frane indotte da un terremoto.

Una strada meno complicata per rappresentare lo scuotimento sismico è l'utilizzo di un parametro sintetico che esprima l'energia di un record accelerometrico. Arias (1970) definisce la quantità che prende il nome di intensità di Arias (I_a):

$$I_a = \left(\frac{\pi}{2g} \right) \int [a(t)]^2 dt$$

I_a è espressa in unità di velocità, comunemente in metri al secondo.

L'intensità di Arias rimpiazza le centinaia di punti rilevati da un record sismico con l'analisi di Newmark, sostituendoli con un unico valore, arrivando di nuovo ad una relazione empirica tra $(A_c)_{10}$, $(A_c)_2$ e I_a . un esempio è dato dalla fig.5.5.

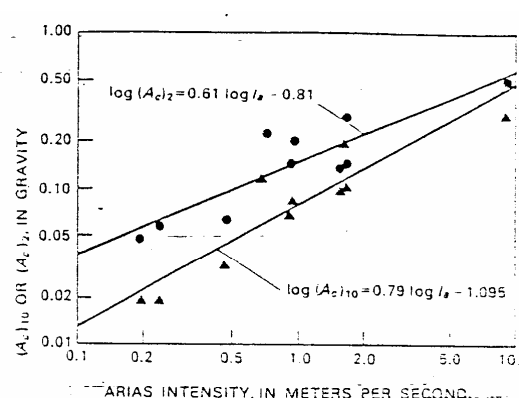


FIGURE 172.— $(A_c)_{10}$ (triangles) and $(A_c)_2$ (circles) versus Arias intensity (I_a) for 10 strong-motion records. Regression lines are also plotted for $\log(A_c)_{10}$ versus $\log I_a$ and $\log(A_c)_2$ versus $\log I_a$. The standard deviations for these regressions are 0.144 and 0.151, respectively.

Fig.5.5 Determinazione dell'intensità di Arias; da R.C. Wilson and D.K. Keefer, , "Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region – An Earth – Science perspective", 1985.

Da tale grafico, conoscendo l'intensità di Arias, si possono stimare direttamente i valori dell'analisi di Newmark, in quei tanti casi in cui è richiesto solo un valore approssimato di $(A_c)_{10}$ e $(A_c)_2$.

L'intensità di Arias può essere stimata mediante leggi di attenuazione che valutano tale parametro in funzione della magnitudo del terremoto e delle distanze dalla sorgente sismica. Le leggi di attenuazione tuttavia non danno indicazioni riguardo alla massima distanza alla quale possono avvenire movimenti franosi. Per arrivare a questo bisogna chiedersi qual è la minima intensità del terremoto espressa come I_a , oppure come parametri di picco, alla quale si possono verificare delle frane su pendii suscettibili. Un primo approccio proposto da Keefer e Wilson (1989) è un diretto confronto tra legge di attenuazione e le frane più distanti dal terremoto, ottenute dallo studio di quaranta terremoti storici, come presentato in fig.5.6. Il paragone può essere realizzato mettendo in grafico la magnitudo contro la distanza dalla sorgente per dati valori di I_a e di probabilità di eccedenza.

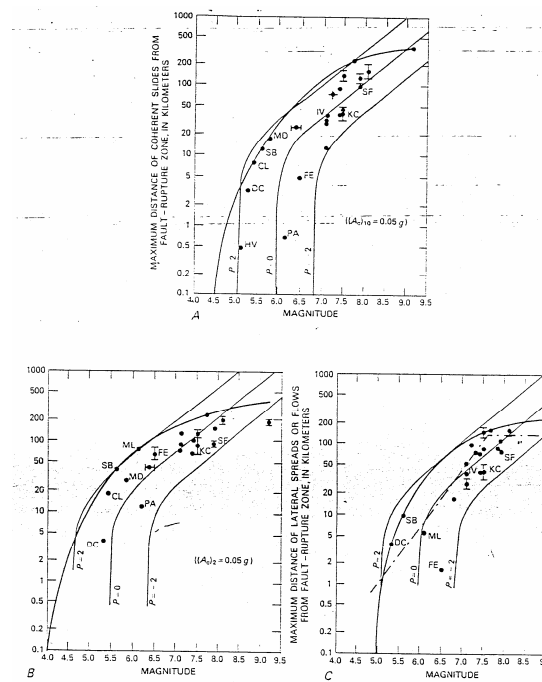


Fig.5.6 Massima distanza a cui può avvenire una frana indotta da un terremoto; da R.C. Wilson and D.K. Keefer, "Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region – An Earth – Science perspective", 1985.

Dopo un'analisi statistica, emerge che i valori minimi di intensità di Arias sono:

- $I_a = 0.5$ m/s per frane coerenti;
- $I_a = 0.15$ m/s per frane disaggregate e crolli;
- $I_a = 0.5$ m/s per liquefazioni e flussi.

Questi valori sono contenuti interamente in due deviazioni standard dalla media, corrispondenti ad una $P=\pm 2$, cioè la probabilità di eccedenza è compresa tra il 2 e il 98%.

Il valore di accelerazione critica di 0.05 g è stato stimato come il valore di suscettibilità dei pendii, alla più grande distanza dall'area sorgente dei terremoti storici studiati.

In conclusione è possibile, utilizzando la legge di attenuazione per l'intensità di Arias, stimare la distanza dalla sorgente alla quale la probabilità che l'intensità ecceda un dato valore sia il 50% ($P=0$). Prendendo $I_a = 0.5$ m/s, valido per frane coerenti, si stima che per un terremoto con $M = 6.5$ la distanza indagata sia circa 24 km dall'evento. Così è possibile disegnare un'area entro la quale la probabilità è maggiore del 50%. Al di fuori di questa si può tracciare un'altra area, in cui la probabilità è finita ma minore del 50%, intorno ai 65 km (Fig.5.7).

Il discorso vale anche per le frane di crollo e le altre frane disaggregate, con una variazione nei valori: la prima distanza, limite che indica il 50% di probabilità, è posta a 41 km, mentre la seconda, quella massima storica, a 112 km. Anche questi valori si riferiscono sempre alla

magnitudo 6.5 di un ipotetico terremoto.

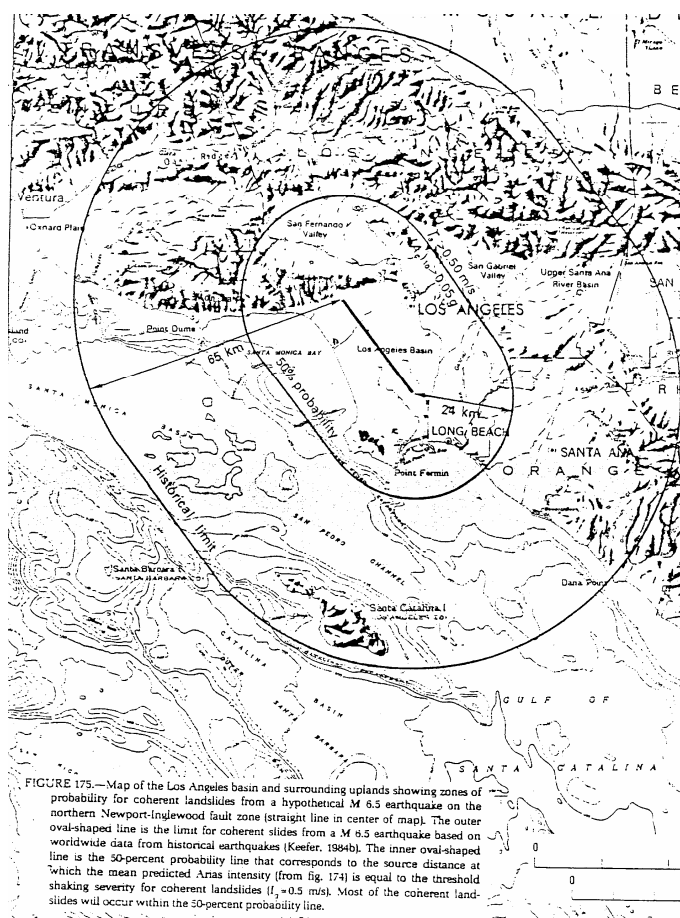


Fig.5.7 da R.C. Wilson and D.K. Keefer, , “Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region – An Earth – Science perspective”, 1985.

5.3 I crolli.

Questa sezione del testo è dedicata alla descrizione più dettagliata di una sola tipologia di frane, ovvero i crolli. Questo perché nel caso in studio si è analizzata una zona di territorio in cui quasi esclusivamente si sono verificate frane di crollo a seguito dell’evento tellurico del 14 ottobre 1997.

5.3.1 Descrizione dei crolli.

Un crollo è un movimento di massa che ha inizio con il distaccamento di roccia o terreno da una parete ripida; il materiale che si distacca percorre una traiettoria che si svolge prevalentemente nell’aria, fin quando impatta alla base della parete, frammentandosi,

rimbalzando e rotolando. Il movimento è molto o estremamente rapido. Il distacco si produce per la presenza, entro l'ammasso roccioso, di fratture che possono essere provocate da circolazione idrica dovuta alle precipitazioni o da cicli gelo-disgelo e umido-asciutto.

Quindi i crolli comprendono una zona di distacco, per lo più su pareti subverticali o aggettanti e una zona di accumulo, che forma fasce di detrito che bordano normalmente le pareti ripide o si insinuano lungo canali. Tali fasce di detrito possiedono la caratteristica di avere una granulometria crescente verso valle, con i grossi massi alla distanza maggiore dalla parete.

La pericolosità delle frane di crollo riguarda l'area sottostante il versante da cui si innesca, cioè l'area potenzialmente raggiunta dai blocchi in movimento; questa dipende, oltre che dalle dimensioni dei blocchi, anche dalla morfologia e geometria del versante che può presentare vie preferenziali non ostacolate, piuttosto che ripiani a minor pendenza sui quali si scarica l'energia del corpo in caduta. Quindi i problemi che una frana di crollo può causare all'uomo sono relativi alle costruzioni e infrastrutture che l'uomo stesso edifica alla base dei versanti: non mancano i casi di interi edifici distrutti dall'impatto dei blocchi e del materiale crollato da pareti sovrastanti abitati posti in luoghi inadeguati; ma soprattutto i danni causati dalle frane di crollo riguardano le vie di trasporto, per lo più strade. L'ostruzione di strade può a prima vista non destare la dovuta attenzione, in quanto le vittime causate sono in genere rare, ma non bisogna sottovalutare l'aspetto della viabilità necessaria a raggiungere le zone colpite; spessissimo capita che centri urbani, più o meno secondari, rimangano isolati e non è facile far loro pervenire in tempo breve gli aiuti necessari.

Le mitigazioni che più frequentemente si utilizzano per difendersi dai crolli, nonché diminuirne gli effetti, sono il disgaggio controllato dei blocchi instabili, il fissaggio dei blocchi stessi alla parete, oppure opere passive atte a fermare o deviare i massi. Queste ultime sono quelle che maggiormente si notano nelle zone interessate dai crolli: reti metalliche avvolgenti le pareti che bloccano i massi sul posto oppure non permettono loro di allontanarsi dalla parete nel caso si stacchino; barriere poste su diversi livelli del versante o più frequentemente lungo i lati delle strade che bloccano il movimento dei blocchi. Purtroppo a volte tali barriere non sono sufficienti a contenere l'impeto degli urti provocati dall'energia dei blocchi e vengono sfondate; in altri casi, a causa dei rimbalzi dei blocchi vengono addirittura scavalcate.

Il crollo come descritto all'inizio del paragrafo avviene se la massa interessata è ben fratturata al di sotto della superficie ed è esposta rispetto alla parete; altrimenti prima di

evolvere in un crollo, il movimento può iniziare come un piccolo scivolamento o un ribaltamento. Questo dipende dal tipo di frattura che si produce nel versante. Si possono riconoscere quattro tipi di frattura:

- a) frattura planare: si ha un'unica superficie di discontinuità orientata al di fuori dell'esposizione del versante, sopra la quale la massa può scivolare;
- b) frattura a cuneo: è composta da due superfici di discontinuità che si intersecano lungo una linea orientata al di fuori della faccia del versante;
- c) frattura da ribaltamento: correlate a lastroni o colonne di roccia separate da superfici di discontinuità subverticali e subparallele al versante, le quali portano al progressivo ribaltamento del corpo roccioso;

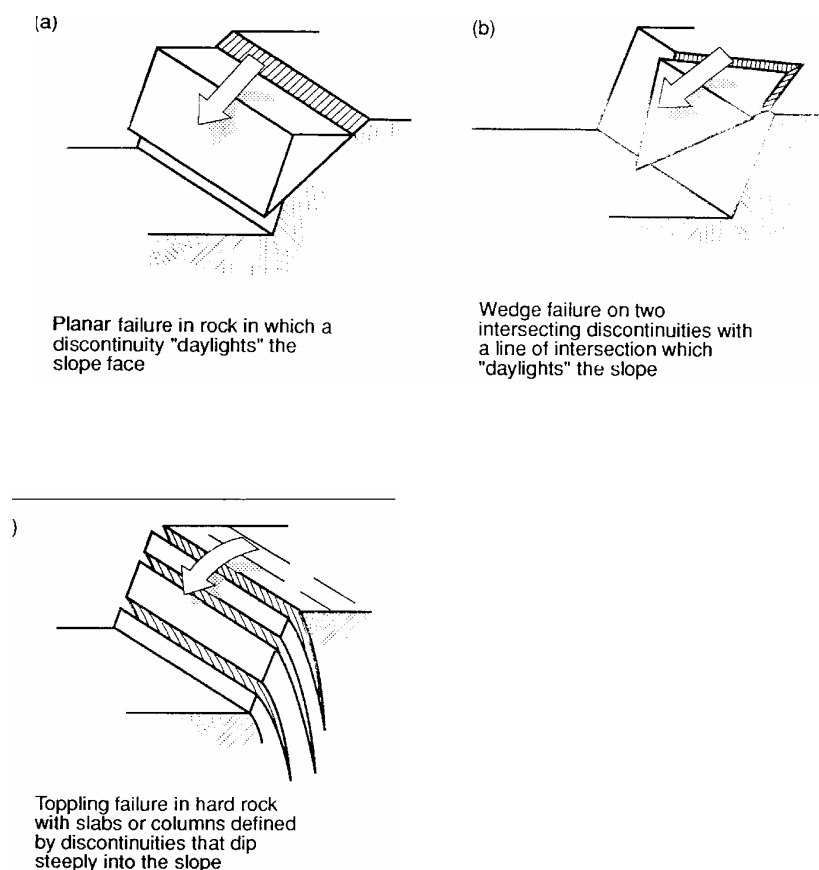


Fig.5.7 Tipi di fratture; da National Research Council, "Landslides, investigation and mitigation", 1996.

Gli studi sulle fratture si compongono di analisi stereografiche per determinare la geometria delle stesse da rapportare con la geometria del versante, utili per le successive analisi di

stabilità basate sul fattore di sicurezza; il dettaglio delle espressioni matematiche esula dagli scopi del presente studio, in quanto esso non è rivolto ad un'analisi di singoli versanti ma comprende una scala più estesa.

5.3.2 Un esempio di crolli indotti da un sisma: il terremoto del Friuli del 1976.

Il 6 maggio 1976, alle ore 20.00, un terremoto di magnitudo 6.4 colpì la regione friulana, nelle vicinanze di Oso di Gemona. La scossa principale durò 50 secondi, preceduta da una scossa più debole di magnitudo 4.5 . Nei quattro mesi successivi scosse più deboli continuarono a scuotere il territorio, fino all'altra scossa violenta di magnitudo 6.1 del 15 settembre.

I danni causati dal sisma sono stati catastrofici, anche perché a seguito della scossa di maggio molti edifici posti alla base dei versanti furono travolti da numerose frane. Questi effetti di superficie sono stati sistematicamente studiati su quasi tutta l'area colpita con lo scopo di ottenere una cartografia che descrivesse la distribuzione dei fenomeni in base anche alle caratteristiche del territorio.

Lo studio delle frane è cominciato con un lavoro di fotointerpretazione delle immagini scattate dopo l'evento, poi confrontate con altre precedenti al sisma, in modo da capire quali frane erano state effettivamente prodotte dal terremoto. Inoltre rilievi sul campo delle frane maggiori hanno integrato le ricerche suddette.

Le frane corrispondevano quasi totalmente a frane di crollo in roccia, dei quali è stato possibile dividere i fenomeni riattivati in zone già instabili (frane recenti, con detritici attivi) da quelli mobilizzati invece per la prima volta nel periodo del terremoto, sempre comparando le foto aeree. Per ogni singolo fenomeno sono state indicate le zone di distacco e quelle di accumulo; per alcuni è stata segnalata anche la traiettoria dei massi di maggior volume più sopravanzati ed il loro punto di arresto. Sono state poi calcolate lunghezze, dislivelli e pendenze medie dei versanti franati.

Si è osservato che i crolli hanno coinvolto nella caduta di grossi blocchi anche i materiali delle falde detritiche sottostanti, anche se le scosse sismiche non le hanno mobilizzate direttamente; solamente alcuni accumuli formati con la scossa di maggio si sono rimobilizzati con la scossa di settembre. Quindi le parti dei versanti maggiormente interessate dai crolli sono state le pareti in roccia molto ripide; inoltre i distacchi non sempre coincidevano con fratture aperte o facilmente penetrabili dalle acque meteoriche, ma spesso la rottura si manifestava in corrispondenza di giunti ben chiusi, rivelati dalla freschezza di

alcune superfici di distacco. La forma dei blocchi distaccati è stata influenzata dalla natura litologica della roccia: banchi di brecce e conglomerati cementati danno grossolani parallelepipedi, mentre strati di dolomie e calcari producono forme più rotondeggianti o prismatiche.

La distribuzione areale delle frane ha messo in evidenza un addensamento intorno alle zone epicentrali. A quel tempo, per produrre una cartografia semi-quantitativa della distribuzione delle frane, il territorio fu suddiviso in maglie quadrate di 1 km di lato e per ogni maglia furono individuati gli elementi di suscettibilità al franamento per crollo. Quindi fu determinata la densità relativa delle frane come numero di fenomeni per ettaro percentuale, riferendosi alla griglia. I dati poi sono stati interpolati in modo da ricavare zone di addensamento delle frane (si nota che al tempo di tali studi, certi lavori si compilavano ancora a mano direttamente su materiale cartaceo, in quanto non si era ancora sviluppata la tecnologia informatica supporto della cartografia digitale).

Non fu facile trovare una valida correlazione tra la densità delle frane e la litologia perché alcune formazioni erano più rappresentate di altre e la distribuzione dei litotipi intorno alla zona epicentrale ovviamente non era omogenea. È stato possibile osservare solo relazioni più qualitative che quantitative, nel senso che formazioni cenozoiche hanno contribuito maggiormente alle frane di neoformazione, di piccole dimensioni, mentre le dolomie triassiche e i calcari giurassici e cretacei hanno contribuito alla rialimentazione di accumuli recenti e con detritici.

La relazione tra frane e litologia risultò indirettamente dall'osservazione del controllo esercitato dalla litologia sulla morfologia e in parte anche sull'altimetria dei versanti: i crolli sono concentrati sulle pendenze elevate, caratterizzate da balze rocciose. Influyente è anche la giacitura degli strati: i versanti più ripidi contengono strati a reggipoggio, spesso coincidenti con le strutture sovrascorse durante l'orogenesi.

Si contò un numero esiguo di frane di neoformazione, mentre numerosissime furono le frane in zone già dissestate. La deduzione che se ne può trarre è che un versante non esaurisce la sua potenzialità franosa con una sola o poche manifestazioni gravitative, perciò le aree coinvolte sono da ritenersi ad elevato pericolo geosismico.

5.4 Le frane indotte dal terremoto del 1997 nella Val Nerina.

Le frane rilevate nella zona di studio sono state quasi esclusivamente crolli. Il 14 ottobre 1997 la zona della Valnerina è stata interessata da una scossa di $M=5.5$. Per quel che riguarda la zona di Colfiorito, interessata dalla prima scossa, le frane presentavano invece una tipologia diversa: scivolamenti traslazionali; questo perché quella porzione del territorio è composta essenzialmente dalla presenza della formazione marnoso-arenacea e da depositi quaternari, in un ambiente prevalentemente collinare o di bassa montagna (Carro, 2000). Diversa è la situazione che si presenta più a sud, nell'area interessata dal presente studio: la litologia, come dettagliatamente descritto nel capitolo I, presenta soprattutto formazioni calcaree, determinanti, insieme alla tettonica in atto, versanti acclivi e pareti subverticali. Questi elementi favoriscono la produzione di crolli.

I fenomeni di crollo rilevati nell'area di studio sono circa 200; la loro distribuzione segue in generale le maggiori valli che si trovano nella zona: la Val Nerina e le valli percorse rispettivamente dal fiume Vigi e dal fiume Corno presentano molti fenomeni sparsi sui loro versanti. Ma grazie al lavoro di fotointerpretazione è stato possibile ricercare le frane presenti in valli minori e in luoghi meno accessibili che spesso non sono indagati nei rilevamenti speditivi post-terremoto. Rilevanti sono i fenomeni osservati tra le località di Agliano e Postignano.

I centri urbani della zona non sono stati coinvolti gravemente dalle frane di crollo del terremoto del 1997, anche perché essi sono di modeste dimensioni e spesso costruiti in siti rilevati rispetto ai fondovalle. Si possono citare i casi di Triponzo e Forfì. Il primo è collocato alla base di una parete rocciosa verticale imbrigliata da reti parafrane e si trova sopra una scarpata che dà sul fondovalle, molto inciso in quel punto; la parete così come la scarpata presentano varie parti instabili che tendono a dare crolli; soprattutto la scarpata minaccia la stabilità della strada lungo la quale si estende il paese. Nella seconda località, Forfì, una frana, questa volta di tipo scivolamento, ha causato il crollo di un muro di cinta che ha travolto e bloccato la via principale che taglia il paese.

Danni più diffusi hanno riguardato le vie di comunicazione: molte strade sono state investite dai blocchi franati che in alcuni casi erano di notevoli dimensioni (alcuni metri cubi); sulla strada che da Cerreto di Spoleto porta a Biselli, sono state danneggiate le coperture di due gallerie, le quali erano state costruite appositamente come riparo da frane, in quanto la strada passa ai piedi di versanti instabili. Sempre in quella zona, all'altezza della forra chiamata "Balza Tagliata" si presenta l'unico caso in cui la strada interrotta da numerosi fenomeni di

crollo non è stata più riaperta alla circolazione; questo ha causato indirettamente anche danni economici legati ad un progetto di riqualificazione della zona: infatti era già nata l'idea di ricostruire un tratto di ferrovia storica che avrebbe probabilmente attirato nuovi turisti; dopo il terremoto il progetto è stato definitivamente abbandonato.



a)



b)



c)

Fig.5.8 a) Crollo in Val Nerina; b) Crollo nei pressi della balza Tagliata; c) Crollo in Località Stravignano Bagni.

CAPITOLO VI

Scelta della legge di attenuazione

6.1 Parametri Sismici.

6.1.1 Intensità di un terremoto.

L'intensità è il più vecchio parametro utilizzato per misurare la violenza di un terremoto. Essa è una descrizione qualitativa degli effetti di un terremoto in un particolare sito, desunta dai danni osservati e dalle reazioni umane (Kramer 1996).

Fin dall'antichità sono state tramandate per mezzo della scrittura descrizioni qualitative degli effetti dei terremoti, quindi il concetto di intensità può tornare utile per ricostruire l'attività sismica storica di una regione, nonché per paragonare in prima approssimazione terremoti in luoghi differenti.

La prima scala di intensità risale agli anni 1880, ad opera di Rossi e Forel (R-F), la quale fu rimpiazzata dalla scala Mercalli (vedi Appendice E); quest'ultima, definita dall'omonimo studioso, fu modificata nel 1931 (prendendo l'acronimo MMI: Modified Mercalli Intensity) per essere utilizzata nei Paesi anglosassoni e per meglio rappresentare le condizioni della California (Richter, 1958).

L'Agenzia Meteorologica Giapponese (JMA) ha una propria scala, mentre nell'Europa centro-meridionale si utilizza la Medvedev-Spoonheuer-Karnik (MSK).

MMI	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
RF	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
JMA	I	II	III	IV	V	VI	VII					
MSK	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII

Figure 2.27 Comparison of intensity values from modified Mercalli (MMI), Rossi-Forel (RF), Japanese Meteorological Agency (JMA), and Medvedev-Spoonheuer-Karnik (MSK) scales. (After Richter (1958) and Murphy and O'Brien (1977).)

Fig.6.1 Comparazione delle scale sismiche; da Kramer, "Geotechnical earthquake engineering", 1996.

L'intensità di un terremoto è generalmente ottenuta intervistando alcuni individui della popolazione colpita, raccogliendo le testimonianze di ciò che hanno visto e le loro reazioni all'evento; nelle zone in cui l'attività sismica è molto frequente esistono delle persone specificatamente incaricate di descrivere i fatti (Kramer, 1996).

L'intensità è generalmente maggiore nelle vicinanze dell'epicentro e l'intensità epicentrale è

usata a volte per descrivere grossolanamente la violenza del terremoto.

Interpolando i dati raccolti dalle interviste è possibile ricostruire mappe di isosisme indicanti i vari livelli di intensità.

6.1.2 Magnitudo di un terremoto.

Con lo sviluppo di moderne strumentazioni per misurare il movimento del terreno durante un terremoto, è stato possibile ottenere dati più oggettivi e quantitativi riguardo ai sismi, arrivando a definire un nuovo parametro sismico che è la magnitudo.

Così come per l'intensità, anche per la magnitudo sono state determinate più scale, riassunte di seguito:

- **Magnitudo Locale (M_L):** Richter nel 1935 definì la magnitudo di terremoti poco profondi come il logaritmo in base 10 della massima ampiezza (in micrometri) registrata su un sismometro Wood-Anderson, collocato idealmente a 100 km dall'epicentro. La scala Richter è la più conosciuta, ma non sempre la più adeguata per descrivere la violenza di un terremoto.
- **Magnitudo di onde superficiali (M_S):** a grandi distanze dall'epicentro, le onde di volume che viaggiano attraverso la crosta terrestre generalmente sono così attenuate che le onde di superficie dominano il moto prodotto; Gutenberg e Richter (1936) definirono una scala di magnitudo basata sulle onde di Rayleigh. La formula per ottenere tale magnitudo è

$$M_S = \log A + 1.66 \log \Delta + 2.0 \quad (6.1)$$

dove A è la massima ampiezza dello spostamento del terreno in micrometri e Δ è la distanza epicentrale di un sismometro misurata in gradi (360° corrispondono alla circonferenza della Terra). Il termine A può essere misurato da vari sismografi, non essendo riferito all'ampiezza della traccia di un particolare sismografo. La M_S è utilizzata per terremoti poco profondi (fino a circa 70 km) e lontani (da circa 1000 km in poi).

- **Magnitudo di onde di volume (m_b):** la "body wave magnitude" (Gutenberg, 1945), come chiamata nel termine originale, è basata sull'ampiezza dei primi pochi cicli delle onde "p", i quali non sono influenzati fortemente dalla profondità ipocentrale (Bolt, 1989). L'espressione al riguardo è:

$$m_b = \log A - \log T + 0.01 \Delta + 5.9 \quad (6.2)$$

dove A è l'ampiezza delle onde "p" in micrometri e T è il periodo (1/sec).

- **Magnitudo momento (M_W):** le precedenti magnitudo sono quantità empiriche basate su misure strumentali, soggette al fenomeno della "saturazione"; infatti per terremoti molto violenti la sensibilità degli strumenti non coglie le caratteristiche dello spostamento dovuto alle scosse; così la M_L può essere misurata fino al valore di 6 o 7, mentre la M_S fino a 8. La sola scala di magnitudo non soggetta al livello delle scosse e quindi alla "saturazione" è la magnitudo momento (Kanamori, 1977; Hanks e Kanamori, 1979); essa è basata sul momento sismico, diretta misura dei fattori che producono la rottura lungo una faglia;

$$M_W = (\log M_0 / 1.5) - 10.7 \quad (6.3)$$

Dove M_0 è il momento sismico (dyne*cm).

6.1.3 Parametri di movimento del terreno.

I parametri che descrivono il movimento generato da un terremoto sono numerosi. Per le applicazioni di questo studio, i parametri considerati sono tre:

- **PGA (Peak Ground Acceleration):** il picco di accelerazione è il parametro più comunemente usato nelle misure di movimento del terreno, soprattutto per quel che riguarda la componente orizzontale (PHA). Il PHA è il maggior valore assoluto ottenuto da un accelerogramma; secondo l'orientazione dell'accelerogramma è possibile registrare più componenti (ad esempio la componente NS e quella WE); il vettore somma di due componenti ortogonali, contenenti i valori maggiori, dà il massimo PHA (Kramer 1996). La componente verticale (PVA) ha ricevuto minor attenzione a causa della minor influenza che le accelerazioni verticali hanno sulla resistenza delle costruzioni antropiche, mentre ben più importanti sono le accelerazioni orizzontali; il PVA è usualmente assunto essere 2/3 del PHA (Newmark e Hall, 1982). Sono frequenti movimenti del terreno con alti picchi di accelerazione, ma questo non implica che siano più distruttivi di movimenti con picchi meno ampi; infatti un picco di accelerazione molto alto si verifica ad alte frequenze ed ha una durata molto breve e questo può causare danni contenuti in vari tipi di costruzioni. Quindi il picco di accelerazione, pur essendo comunemente usato, non fornisce informazioni sulle frequenze e le durate contenute in un record sismico (Kramer, 1996).
- **PGV (Peak Ground Velocity):** i records di velocità sono ottenuti interpolando quelli

di accelerazione di un accelerogramma, potendo così ricavare il picco di velocità; le velocità sono meno sensibili alle alte frequenze, cosicché descrivono meglio i movimenti alle frequenze intermedie; anche per il PGV si utilizza maggiormente la componente orizzontale (PHV), la quale è ben correlata con l'intensità dei terremoti (Trfunac e Brady 1975a; Krinitzsky e Chang, 1987).

- **AI (Arias Intensity):** questo parametro sintetico definito da Arias (1970) riassume in un unico valore tutte le informazioni contenute in un record sismico, essendo l'integrale da 0 a ∞ dell'accelerazione al quadrato nel tempo; generalmente è espresso in m/sec, quindi ha le dimensioni di una velocità; grazie alle caratteristiche della sua formulazione, tale parametro è indipendente dal metodo utilizzato per definire la durata del movimento.

6.2 Leggi di attenuazione.

6.2.1 Magnitudo e distanza.

Un terremoto è l'espressione dell'energia rilasciata da una rottura lungo una faglia e si manifesta attraverso onde. La magnitudo di un terremoto è strettamente correlata all'energia rilasciata e alle caratteristiche delle onde, le quali possono essere osservate su un sismogramma, in termini di ampiezza, frequenza e durata delle velocità registrate.

Le onde si propagano all'interno della crosta terrestre e parte della loro energia viene assorbita dai materiali che attraversano. Così l'energia specifica (energia per unità di volume) decresce con l'aumentare della distanza dalla sorgente sismica.

La distanza dalla sorgente può essere interpretata in diversi modi: innanzitutto come distanza dall'ipocentro del terremoto, oppure dall'epicentro del terremoto. Ma se l'area di rottura della faglia comprende una significativa lunghezza rispetto alla posizione del sito in questione, allora le suddette non sono un'accurata rappresentazione dell'effettiva distanza. Ciò che si può considerare sono la minor distanza dalla zona di rottura oppure la minor distanza dalla proiezione in superficie della faglia che ha generato l'evento. Queste ultime due necessitano di una buona conoscenza della struttura dell'area interessata e del meccanismo con il quale è avvenuto il terremoto; esse sono anche le più usate in quelle relazioni predittive che saranno spiegate in seguito. Infatti, ai fini delle previsioni degli effetti che un terremoto può causare in superficie, sono state sviluppate delle relazioni empiriche che cercano di determinare la risposta del terreno in funzione della magnitudo e della distanza .

6.2.2 Sviluppo delle leggi di attenuazione.

Le leggi che esprimono l'andamento, a partire dalla sorgente di un terremoto, dei parametri del movimento del terreno generalmente sono funzioni della magnitudo, della distanza e spesso anche di altre caratteristiche quali il tipo di sorgente, il cammino di propagazione delle onde e condizioni di sito locali. Tali leggi traggono la loro origine dallo sviluppo di regressioni desunte dai records accelerometrici dei terremoti passati, quando essi siano disponibili. Sono leggi empiriche e quindi spesso hanno una validità spaziale ristretta, relativa alla regione dei terremoti studiati e al data set utilizzato.

Le più comuni si basano su alcune osservazioni:

- i valori dei picchi dei parametri di movimento sono approssimativamente distribuiti come una funzione lognormale, quindi il logaritmo del parametro è distribuito normalmente;
- la magnitudo di un terremoto è tipicamente definita come il logaritmo del picco del parametro di spostamento, perciò il logaritmo del parametro è proporzionale alla magnitudo;
- l'espansione delle onde sismiche causa l'ampiezza delle cosiddette onde di volume (p e s), che decresce come il reciproco della distanza; mentre l'ampiezza delle onde di superficie (primariamente le Rayleigh) decresce come il reciproco della radice quadrata della distanza;
- l'area di rottura della faglia è direttamente proporzionale alla magnitudo;
- parte dell'energia trasportata dalle onde sismiche è assorbita dai materiali che esse attraversano, per cui le ampiezze del movimento del terreno decrescono esponenzialmente con la distanza;
- i parametri del movimento possono essere influenzati dalle caratteristiche delle sorgenti (ad esempio faglie inverse piuttosto che dirette) o dalle caratteristiche di sito (la geologia locale).

Combinando le osservazioni considerate, un'espressione generale per le leggi di attenuazione dei parametri sismici è:

$$\log Y = a + b M + c M^d + e \log(R + f \exp(g M)) + h R + f(\text{sorgente}) + f(\text{sito}) + \sigma \quad (6.4)$$

dove Y è il parametro studiato, M la magnitudo, R la distanza dalla sorgente, (a,b,c,d,e,f,g,h) sono coefficienti empirici desunti dalle regressioni e σ rappresenta l'incertezza dei valori del

parametro, cioè una stima della deviazione standard.

Questa espressione può essere più o meno semplificata relativamente alle informazioni che si possiedono riguardo il terremoto e le aree di studio.

Di seguito verranno descritte nei particolari le leggi di attenuazione utilizzate nell'applicazione del presente studio; la scelta è stata determinata sulla base delle richieste di ogni legge rispetto ai dati sismici disponibili per questo studio.

6.2.3 Legge di Sabetta e Pugliese (1996).

La prima legge di attenuazione esaminata è stata quella proposta da Sabetta e Pugliese (1996). Essa si basa sui dati di 17 terremoti avvenuti tutti in Italia; quindi è stato ipotizzato che i coefficienti empirici inseriti nella formula potessero rispecchiare le caratteristiche del sito del terremoto dell'ottobre 1997 in Umbria.

Le informazioni richieste da questa legge sono:

- la magnitudo del terremoto corrispondente alla magnitudo di superficie (M_s) per valori maggiori o uguali a 5.5, mentre coincide con la M_L per valori minori di 5.5;
- la distanza dalla sorgente, che può essere in alternativa la distanza dall'epicentro o la distanza dalla proiezione in superficie della faglia;
- la geologia del sito, della quale sono distinte tre classi: depositi rigidi, alluvioni poco profonde (minori di 20 m di profondità) e depositi profondi (maggiori di 20 m); la prima è caratterizzata da una velocità media delle onde di 800 m/sec mentre le altre due da 400 ad 800 m/sec.

Le informazioni sulla geologia relative alle stazioni che si sono attivate il 14 ottobre 1997 alle 17:23 dell'ora locale riportavano pochi dettagli, quindi non si è potuto far altro che approssimare le caratteristiche litologiche inserite nell'applicazione della legge; alcune di queste informazioni sono state recuperate dalle carte geologiche al 100,000, conoscendo le coordinate delle stazioni.

Sabetta e Pugliese hanno proposto più formule che differiscono le une dalle altre per i coefficienti e per i parametri studiati, ma tutte hanno la forma generale:

$$\log_{10} Y = a + b M + c \log_{10} (R^2 + h^2)^{1/2} + e_1 S_1 + e_2 S_2 \pm \sigma \quad (6.5)$$

dove i fattori S_i si riferiscono alla geologia del sito e assumono i seguenti valori: $S_1=1$ per depositi poco profondi, $S_2=1$ per depositi profondi e 0 in altro caso; R è la distanza dalla

sorgente e h una costante.

Il parametro Y può essere a seconda dei casi la PGA (picco di accelerazione), la PGV (picco di velocità) o l'AI (arias intensity).

In base ai dati in possesso, sono state scelte tre versioni della legge, riassunte nella tabella 6.1 (per tutte vale la componente accelerometrica orizzontale):

Y	DISTANZA	a	b	c	e1	e2	h	σ
PGA (g)	faglia	-1.562	0.306	-1	0.169	0	5.8	0.173
PGV (cm/sec)	faglia	-0.710	0.455	-1	0.133	0.133	3.6	0.215
PGA (g)	epicentro	-1.845	0.363	-1	0.195	0	5.0	0.190
PGV (cm/sec)	epicentro	-0.828	0.489	-1	0.116	0.116	3.9	0.249
AI (cm2/sec3)	epicentro	0.729	0.911	-1.818	0.244	0.139	5.3	0.397

Tab. 6.1: coefficienti della legge di Sabetta e Pugliese (1996).

La validità della legge di Sabetta e Pugliese rientra nei limiti di magnitudo compresa tra 4.6 e 6.8 e per distanze inferiori ai 100 km.

6.2.4 Legge di Spudich ed altri (1999).

La legge che per semplicità verrà chiamata di Spudich è stata scelta sia per la sua formulazione recente, sia perché calcolata prettamente per terremoti in regime tettonico distensivo; inoltre tra i molti records sismici studiati, appartenenti a terremoti di varie parti del pianeta, compaiono anche dati su terremoti italiani.

Le informazioni da inserire nella legge sono:

- la magnitudo, come magnitudo momento;
- la distanza di Joyner e Boore (r_{jb}) definita come la minima distanza dalla proiezione in superficie della rottura della faglia;
- la geologia superficiale (profondità minore di 30 m), distinguendo siti in roccia e siti su depositi.

L'espressione generale è la seguente:

$$\log_{10} Y = a + b (M-6) + c (M-6)^2 + d \log_{10} D + e \Gamma \pm \sigma \quad (6.6)$$

dove $D = (r_{jb}^2 + h^2)^{1/2}$, h una costante e Γ è 0 per siti in roccia, 1 per siti su depositi; la deviazione standards è $(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$.

Nella tabella 6.2 vengono riportati i coefficienti utilizzati:

Y	distanza	a	b	c	d	e	h	σ_1	σ_2
PGA (g)	faglia	0.299	0.299	0	-1.052	0.112	7.27	0.172	0.108

Tab. 6.2: coefficienti della legge di Spudich (1999).

La distanza è stata approssimata alla proiezione in superficie della faglia, in quanto è cosa difficile conoscere l'area di rottura della stessa.

Il campo di validità della legge è per magnitudo maggiori di 5.0 e distanze minori di 105 km.

6.2.5 Legge di Boore (1993).

Per svolgere una più ampia indagine sulle reali capacità predittive delle leggi di attenuazione, sono state considerate altre tre leggi che non riguardavano dati italiani; si è cercato di capire se i coefficienti empirici potessero avere una certa validità anche al di fuori dei dati di origine.

Una prima legge è quella di Boore, il quale ha basato i suoi calcoli su dati del Nord America, per terremoti compresi tra 5.0 e 7.7 di magnitudo e distanze massime di 100 km dalla proiezione in superficie della faglia.

Le classi geologiche richieste in questa legge si basano sulla velocità delle onde nei primi 30 m di profondità come è proposto nelle tabelle sottostanti

L'equazione generale è:

$$\log_{10} \text{PGA (g)} = a + b (M - 6) + c \log_{10} R + d G_B + e G_C \pm \sigma \quad (6.7)$$

dove M è la magnitudo momento, $R = (r^2 + h^2)^{1/2}$, con "r" la più piccola distanza dalla proiezione in superficie della faglia.

I fattori G e i coefficienti sono presentati nelle tabelle 6.3, 6.4, 6.5.

	= 0	Per classe A		= 0	Per classe A
G_B	= 1	Per classe B	G_C	= 0	Per classe B
	= 0	Per classe C		= 1	Per classe C

Tab. 6.3: valori dei fattori geologici della legge di Boore (1993).

A	> 750 m/sec
B	360 – 750 m/sec
C	180 – 360 m/sec

Tab. 6.4: velocità di propagazione per le classi geologiche della legge di Boore (1993).

Componente	a	b	c	d	e	h	σ
Random	-0.105	0.229	-0.778	0.162	0.251	5.57	0.230
Larger	-0.038	0.216	-0.777	0.158	0.254	5.48	0.205

Tab. 6.5: coefficienti della legge di Boore (1993).

La componente nell'ultima tabella è riferita alla componente orizzontale della registrazione: nel caso “random” è stata scelta casualmente una delle due componenti (NS o WE), mentre nel caso “larger” è stata scelta la maggiore delle due in valore assoluto.

6.2.6 Legge di Joyner e Boore (1988).

Joyner e Boore hanno prodotto una legge per il picco di velocità PGV, per terremoti da 5.0 a 7.7 di magnitudo momento, con la seguente formula:

$$\log_{10} \text{PGV (cm/sec)} = a + b (M - 6) + c \log_{10} R + d R + e \pm \sigma \quad (6.8)$$

con $R = (r^2 + h^2)^{1/2}$, dove “r” è la più corta distanza dalla proiezione verticale della rottura della faglia sulla superficie terrestre.

componente	a	b	c	d	e	h	σ
Random	2.09	0.49	-1	-0.0026	0.17	4.0	0.33
Larger	2.17	0.49	-1	-0.0026	0.17	4.0	0.33

Tab.6.6: coefficienti della legge di Joyner e Boore (1988)

6.2.7 Legge di Campbell e Bozorgnia (1994).

Come ultima legge viene proposta quella di Campbell e Bozorgnia:

$$\ln \text{PGA (G)} = - 3.512 + 0.904 M - 1.328 \ln (R^2 + (0.149 \exp (0.647 M))^{1/2} + \\ + (1.125 - 0.112 \ln R - 0.0957 M) F + (0.440 - 0.171 \ln R) S_{\text{SR}} + \quad (6.9) \\ +(0.405 - 0.222 \ln R) S_{\text{HR}} \pm \sigma$$

M è la magnitudo momento, R la più vicina distanza (minore o uguale a 60 km) dalla rottura della faglia (con un minimo valore di 5.0 km per terremoti di magnitudo 5.5); F è il fattore relativo al tipo di sorgente che vale 0 per faglie normali (come nel caso in studio) e 1 per faglie inverse o sovrascorrimenti; $S_{\text{SR}} = 1$ per depositi sedimentari del Terziario, $S_{\text{HR}} = 1$ per roccia e entrambi sono nulli per depositi alluvionali; $\sigma = 0.889 - 0.0691 M$, con M minore o uguale a 7.4, mentre è uguale a 0.38 per M maggiore di 7.4.

La legge è stata calcolata per terremoti da 5.0 a 7.7 M.

6.2.8 Ricerca della legge più adatta.

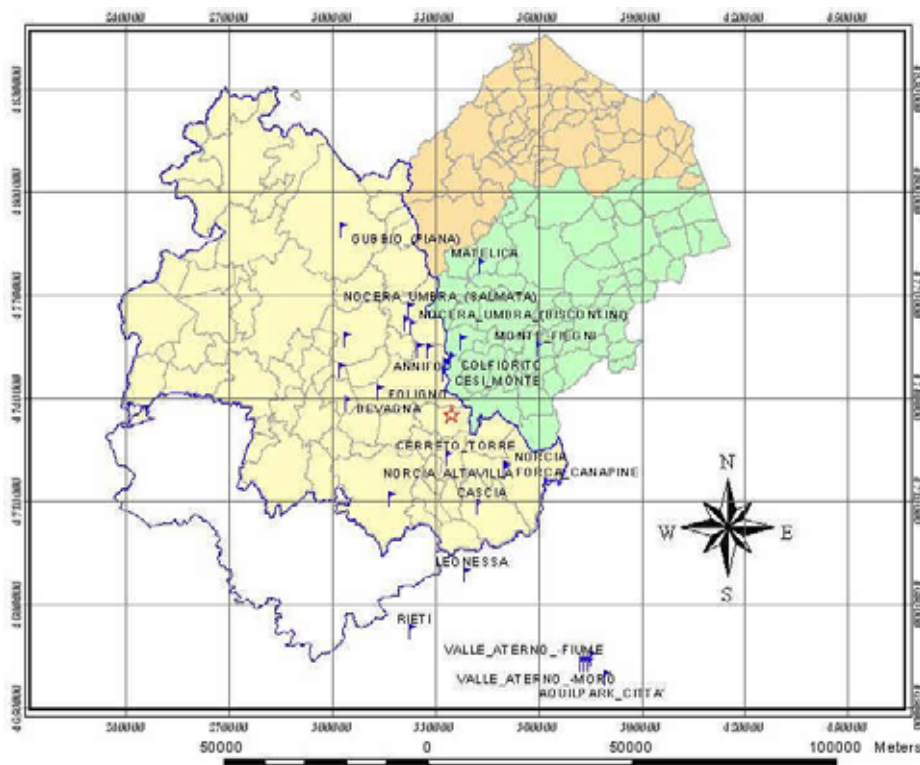


Fig.6.2 Stazioni accelerometriche attivate il 14 ottobre 1997.

Avendo a disposizione i dati di circa una trentina di stazioni accelerometriche attivate il 14 ottobre 1997, sono state applicate le varie leggi e si è cercato di capire quale tra quelle scelte dava un errore minore rispetto ai dati registrati.

Siccome due elementi fondamentali per le leggi sono la distanza e la geologia, è stato necessario abbinare tali caratteristiche alle stazioni. Infatti è stata creata una tabella nel SIT contenente i nomi delle stazioni, la geologia associata e i rispettivi coefficienti di ogni legge. Inoltre, un SIT permette di produrre delle carte di distanza da un oggetto rasterizzato, che in questo caso sono l'epicentro e la proiezione della faglia in superficie; esse sono state sovrapposte alla mappa delle stazioni attivate, in modo da ricavare la distanza dalla sorgente. Questa operazione crea una tabella in cui sono contenute tutte le possibili combinazioni tra gli attributi delle mappe di input; così per ogni stazione è stata ottenuta la distanza sia dall'epicentro che dalla faglia.

All'interno del DBMS (Data Base Management System) sono state applicate le leggi di attenuazione, conoscendo magnitudo del terremoto, distanza delle stazioni dalla sorgente, geologia dei siti delle stazioni e i coefficienti empirici. Perciò sono stati calcolati valori dei parametri di PGA, PGV e AI nei vari casi.

Per ogni legge è stato creato un grafico che disegnasse la curva teorica per poterla confrontare direttamente con i dati registrati.

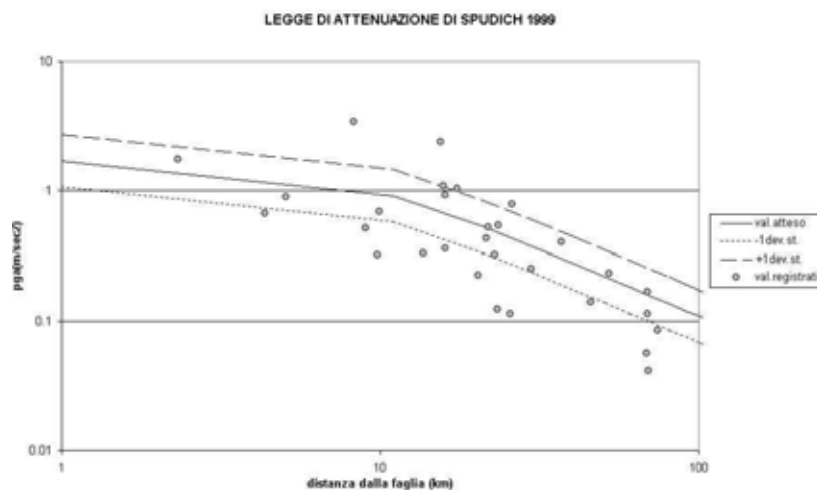


Fig.6.3 Legge di attenuazione di Spudich (1999).

In Appendice H sono contenuti i grafici relativi alle altre leggi analizzate.

Cinque delle leggi a disposizione riguardavano il calcolo della PGA, tre della PGV, mentre una sola dava i valori di AI.

Osservando i grafici ci si è accorti che in generale le leggi sovrastimano i dati reali e che alcuni di questi dati presentano valori anomali per tutte le leggi. Quindi è stato ipotizzato un errore sistematico di alcune registrazioni, imputato agli strumenti mal posti o collocati in siti soggetti ad una forte amplificazione delle onde sismiche.

Per poter confrontare le leggi riguardanti lo stesso parametro sismico, inizialmente sono stati analizzati gli scarti tra i valori attesi e quelli misurati. In seguito, per valutarne l'importanza, sono state considerate le percentuali degli scarti rispetto ai dati reali, come rapporto scarto/dato reale, moltiplicato per cento.

Dall'analisi delle leggi restituanti i valori di PGA, si è notato che gli scarti e le percentuali diminuivano sensibilmente applicando le leggi diminuite di una deviazione standard. Questo risultato si è rivelato favorevole anche nel confronto con le leggi migliori riguardanti PGV e AI.

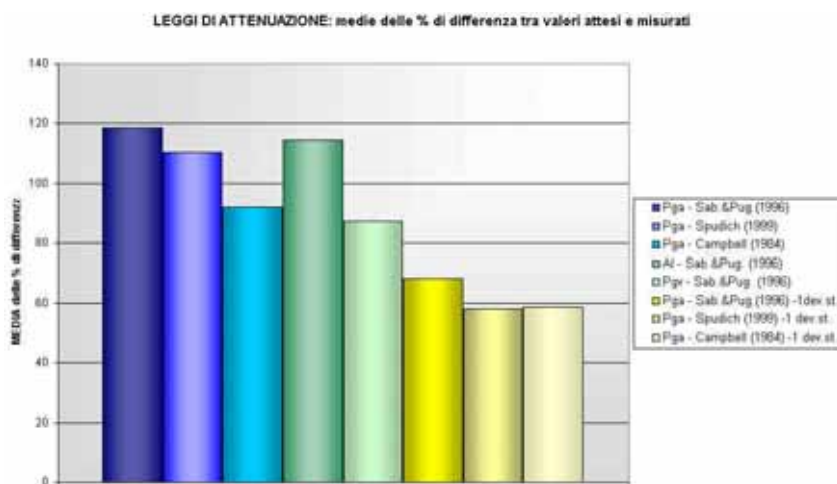


Fig.6.4 Percentuali degli scarti relativi alle leggi di attenuazione migliori.

Per quel che riguarda la PGA, le leggi di Spudich (1999) e di Campbell - Bozorgnia (1994) diminuite di una deviazione standard sono risultate le migliori, equivalendosi relativamente tra loro. La legge di Campbell - Bozorgnia (1994) è stata scartata perché valida solo per distanze dalla sorgente comprese tra i 5 e i 60 km; l'area d'interesse ha una lunghezza massima di circa 20 km, perciò i primi 5 km dall'epicentro sono rilevanti e non possono essere esclusi dall'applicazione. Quindi in definitiva è stata scelta la legge di Spudich (1999) quale migliore per l'area di studio nello stimare il valore di PGA, ricordando che essa è valida per terremoti generati da strutture distensive.

Per stimare il valore di PGV è risultata migliore la legge di Sabetta e Pugliese (1996) con distanza epicentrale.

6.3 Mappe delle leggi di attenuazione.

Utilizzando il software Ilwis, sono state prodotte le mappe delle leggi di attenuazione, scelte in base ai criteri sopra citati. Infatti fornendo i coefficienti delle varie leggi, abbinati alle relative mappe delle distanze dalla sorgente e della geologia, è possibile inserire la formula che restituisce la mappa raster calcolata, in cui ogni pixel contiene un valore del parametro considerato.

Sono state prodotte 3 mappe:

- mappa della legge di Spudich (1999) diminuita di una deviazione standard per la PGA;
- mappa della legge di Sabetta e Pugliese (1996) con distanza epicentrale per la PGV;
- mappa della legge di Sabetta e Pugliese (1996) per l'AI.

Le leggi scelte richiedono informazioni distinte riguardo alla geologia, quindi nella formula di calcolo delle mappe raster è stato necessario abbinare delle mappe derivate dalla mappa geologica. Infatti, a seconda dei vari casi, sono state prodotte mappe binarie, ovvero contenenti solo i valori 1 e 0, indicanti la presenza o no di alcune classi geologiche, considerate individualmente (substrato, depositi sottili, depositi profondi,...).

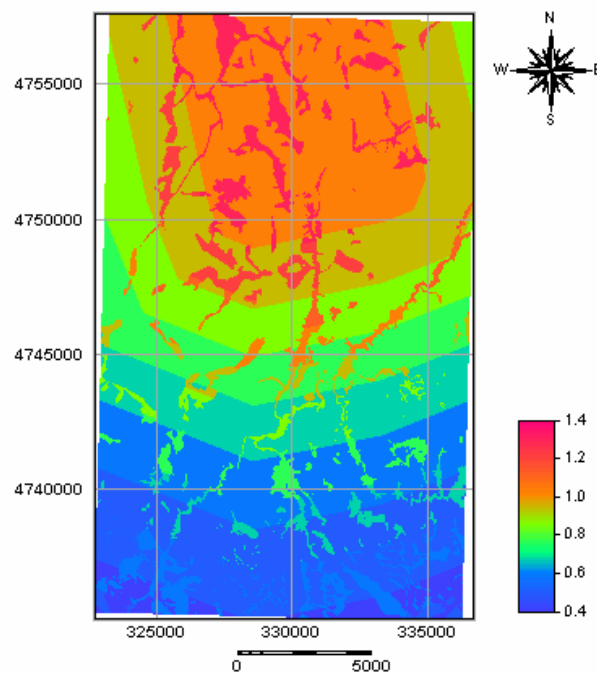
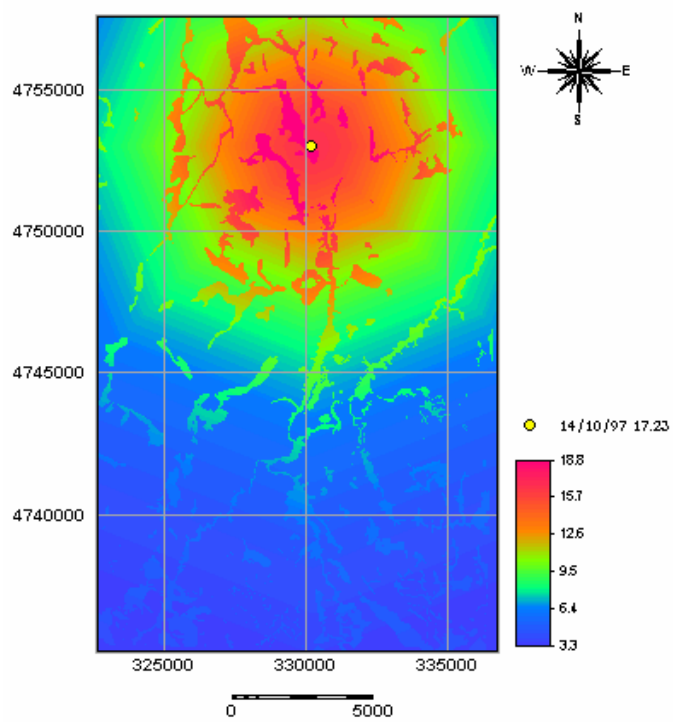
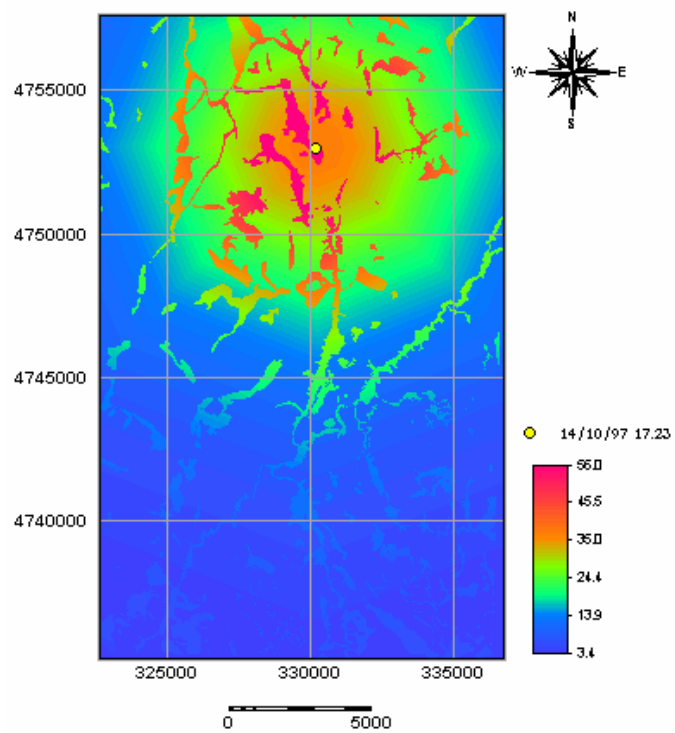


Fig.6.5 Mappa dei valori di PGA (m/sec²), inerenti all'area di studio.



a)



b)

Fig.6.6 a) Mappa dei valori di PGV (cm/sec); b) mappa dei valori di AI (cm/sec).

CAPITOLO VII

Produzione di una mappa della susceptibilità alle frane di crollo

7.1 L'applicazione.

L'applicazione rivolta allo studio dei fenomeni franosi è stata basata essenzialmente sull'analisi statistica dei dati, in modo da verificare l'esistenza di relazioni tra le frane di crollo e i parametri considerati quali pendenze, parametri sismici e geologia.

I parametri sono stati analizzati singolarmente attraverso una statistica monovariata e in secondo luogo attraverso una statistica multivariata, in modo da trovare le relazioni che non sono risultate dalla prima.

Le relazioni evidenziate nell'analisi hanno permesso l'inserimento dei parametri all'interno di una regressione lineare che restituisse i coefficienti da inserire in una legge di suscettibilità alle frane di crollo.

Infine, partendo dalla legge proposta, è stato possibile produrre la relativa mappa di suscettibilità riguardante l'area di studio.

7.2 Mappa delle pendenze.

La pendenza è una delle cause che determinano le frane; quindi partendo dal modello digitale del terreno (ingl. DEM) è stata ricavata la mappa delle pendenze. L'operazione è stata svolta con Arc/Info, il quale utilizza l'algoritmo di Horn (1981) per restituire le pendenze a partire dai valori delle quote. Il calcolo della mappa rientra nelle cosiddette "neighbourhood operations", operazioni compiute su matrici, alle cui celle vengono assegnati dei pesi secondo l'algoritmo utilizzato; il valore del risultato viene assegnato alla cella centrale della matrice.

Per calcolare i gradienti, la matrice utilizzata è 3x3, ossia:

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Le formule per i gradienti, applicando l'algoritmo di Horn alla matrice, risultano:

$$\delta z / \delta x = [(a + 2d + g) - (c + 2f + i)] / 8 * L \quad (7.1)$$

$$\delta z / \delta y = [(a + 2b + c) - (g + 2h + i)] / 8 * L \quad (7.2)$$

dove L è la lunghezza del pixel.

Infine la formula della pendenza è:

$$S = \operatorname{tg} \alpha = \sqrt{[(\delta z / \delta x)^2 + (\delta z / \delta y)^2]} \quad (7.3)$$

dove S è la pendenza in gradi e α è l'angolo del pendio.

La mappa risultante dal DEM dell'area di studio è visualizzata nella fig.7.1.

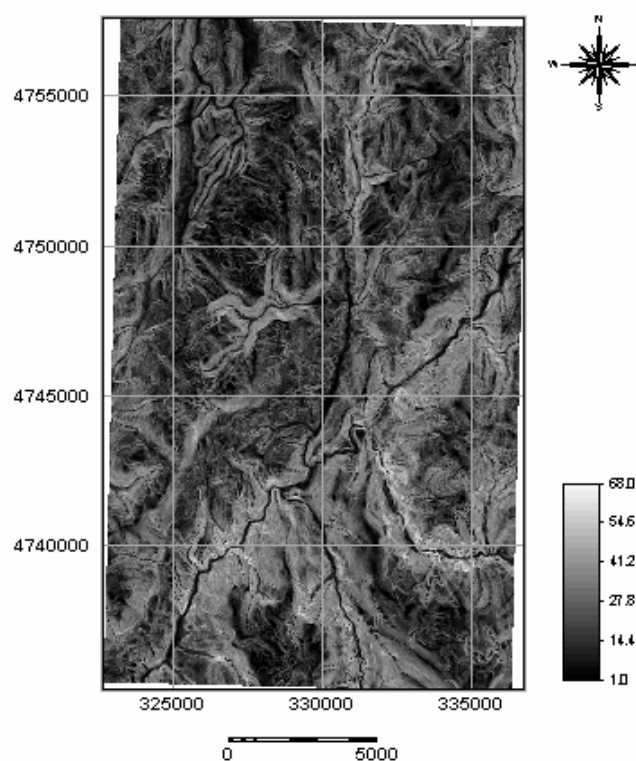


Fig.7.1 Mappa delle pendenze, ricavata per interpolazione del DEM.

7.3 Suddivisione della mappa geologica.

La mappa geologica precedentemente prodotta è stata suddivisa in tre classi generali che raggruppano le formazioni geologiche aventi caratteristiche simili:

- calcari e calcari marnosi;
- marne e marne calcaree;
- depositi.

Ognuna è servita per creare le mappe binarie indicanti la presenza o l'assenza di una classe, in modo da cercare successivamente una relazione tra frane e geologia.

La scelta delle classi deriva dal fatto che le frane studiate sono del tipo "crollo", la cui genesi avviene principalmente su roccia fratturata che può dare origine a blocchi.

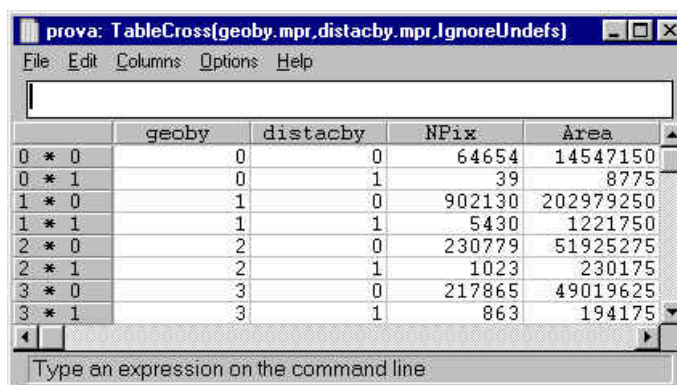
Nella classe "calcari e calcari marnosi" vengono comprese le formazioni CM, CD, Co, MAI, Sr, Bi, Bu (vedi la legenda della mappa geologica, CAP. I). Le formazioni MF, RA, Sc, tr1

sono inserite nella classe "marne e marne calcaree", mentre le restanti a, dta,dt1, fl2, cnd, fra, frq entrano nella classe "depositi".

7.4 Analisi statistica.

Primo passo dello studio riguardante le frane è stato la ricerca delle correlazioni tra le zone di distacco (che in seguito saranno nominate genericamente come "frane") e i parametri scelti per l'applicazione: pendenza, geologia, PGA, PGV, AI. Questa prima fase è necessaria per individuare i parametri che maggiormente influenzano il verificarsi delle frane, in modo da rendere lecito un loro inserimento in una legge che fornisca un valore indicante la suscettibilità alle frane stesse.

Per evidenziare le correlazioni, le mappe parametriche raster sono state sovrapposte con la mappa delle frane. Ad ogni parametro corrisponde una tabella composta da due campi: uno contenente le combinazioni uniche tra le classi del parametro considerato e presenza/assenza di frane in quella classe; l'altro contenente il numero di pixels corrispondente alle combinazioni uniche. Per ogni combinazione unica è stata calcolata la densità relativa delle zone in frana, come rapporto tra l'area in frana in ogni combinazione e l'area della combinazione (per area si intende il numero di pixels e l'area di ogni pixel è conosciuta).

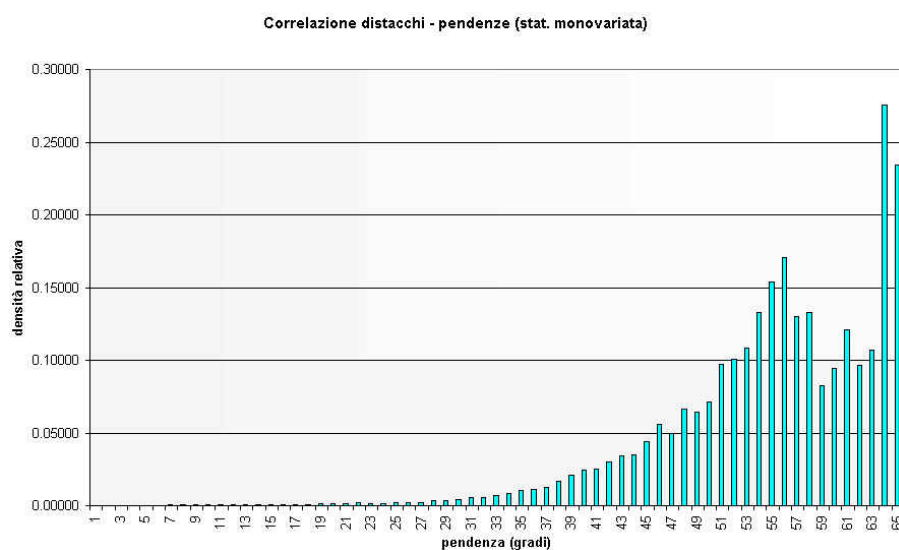


	geoby	distacby	NPix	Area
0 * 0	0	0	64654	14547150
0 * 1	0	1	39	8775
1 * 0	1	0	902130	202979250
1 * 1	1	1	5430	1221750
2 * 0	2	0	230779	51925275
2 * 1	2	1	1023	230175
3 * 0	3	0	217865	49019625
3 * 1	3	1	863	194175

Fig.7.2 Esempio di "Table cross" del software Ilwis, risultante dall'incrocio di due mappe.

Dai records della tabella sono stati estratti quelli contenenti la presenza di frane, in modo da produrre un grafico le cui ascisse rappresentano le combinazioni uniche e le ordinate la densità relativa delle frane.

Producendo un grafico per ogni parametro, si è notato come le frane fossero correlate alle pendenze e alla geologia.



*Fig.7.3 Densità relativa delle zone di distacco rispetto alle pendenze;
(in Appendice H sono contenuti i grafici relativi alle altre correlazioni)*

I risultati che riguardano la geologia indicano che la maggior parte delle frane sono avvenute su calcari: ciò è dovuto in parte al fatto che i calcari ricoprono una vasta porzione del territorio analizzato e in parte al fatto che la stessa geologia è relazionata alle pendenze; infatti i calcari danno versanti ripidi e scoscesi, mentre le marne e soprattutto i depositi si trovano generalmente dove i pendii si addolciscono. Tale osservazione è stata confermata incrociando la mappa delle pendenze con la mappa delle tre classi geologiche sopra descritte.

In prima analisi sembrerebbe che i parametri sismici, quali PGA, PGV, AI, non siano correlati in alcun modo alle frane; bisogna considerare che essi sono espressione del terremoto, il quale è una causa scatenante le frane; ma le cause scatenanti non hanno effetto se nel sito in questione non sono presenti le cause determinanti, come la pendenza e la geologia.

Quindi è necessaria un'ulteriore analisi che permetta di comprendere l'interazione tra tutti i parametri; questo è permesso dalla statistica multivariata che ha lo scopo di analizzare i parametri non più singolarmente, ma considerandoli contemporaneamente.

7.4.1 Correlazione tra parametri sismici - pendenza e frane.

Per poter considerare contemporaneamente la PGA e la pendenza sono state incrociate le rispettive mappe parametriche, mentre la mappa risultante è stata incrociata con la mappa delle frane. Nella tabella risultante è stata calcolata la densità relativa delle frane. I dati della tabella sono stati ordinati in primo luogo per la presenza/assenza di pixels in frana, secondariamente in ordine crescente di pendenza e infine in ordine crescente di PGA. In tal modo è stato possibile estrapolare i dati necessari per disegnare un grafico della densità relativa sopra le combinazioni uniche.

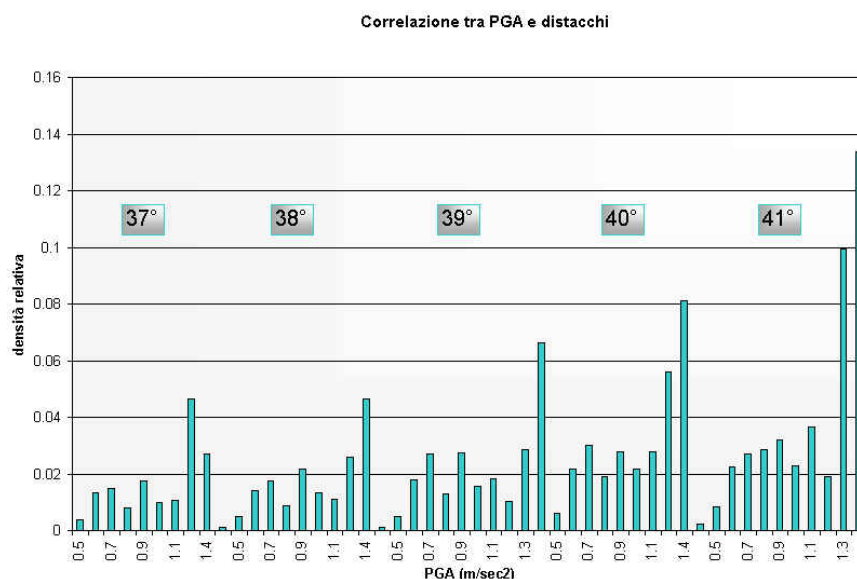


Fig.7.3 Andamento della densità relativa rispetto alla PGA, a pendenze fissate.

Dalla figura si può notare come la densità relativa cresca al crescere delle pendenze ed inoltre come lungo questa tendenza siano presenti molti trends ripetitivi che si concludono con valori di picco. I trends sono dovuti ai valori di PGA; infatti, per un medesimo valore di pendenza, la densità relativa tende a crescere al crescere dei valori di PGA, evidenziando (come non era stato possibile nella statistica univariata) che anche tale parametro sismico influisce sulla presenza delle frane. In questo modo risulta coerente la scelta della PGA come parametro da inserire all'interno di una legge di suscettibilità alle frane.

Anche per la PGV e l'AI è stata ripetuta la medesima analisi; i risultati ribadiscono quanto trovato per la PGA, evidenziando come la densità relativa cresca al crescere della PGV per un dato valore di pendenza; lo stesso vale per l'AI.

I grafici relativi alle correlazioni della PGV e dell'AI sono contenuti in Appendice G.

7.5 Produzione della mappa di suscettibilità alle frane di crollo.

7.5.1 Determinazione di una legge per la suscettibilità (2 variabili).

Fino a questo punto l'informazione ottenuta è la correlazione tra i parametri considerati singolarmente e le frane; ciò che manca è riunire i parametri in un'espressione unica in modo da ottenere un valore sintetico che riassume tutti i dati raccolti. Uno strumento che permette di esprimere la relazione di una variabile dipendente con più di una variabile indipendente è la **regressione multipla**. Con il metodo dei minimi quadrati, sono stati trovati i coefficienti di tre rette di regressione in cui la variabile dipendente è la densità relativa delle frane, mentre le variabili indipendenti sono i parametri. Le tre rette di regressione hanno una forma generale come mostrato di seguito:

$$y = a x_1 + b x_2 + c \quad (7.4)$$

$$\log y = a x_1 + b x_2 + c \quad (7.5)$$

$$\log y = a x_1 + b \log x_2 + c \quad (7.6)$$

dove y è la densità relativa, x_1 è la pendenza, x_2 è uno dei tre parametri sismici PGA, PGV, AI.

Inserendo nelle regressioni come parametro sismico la PGA, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

$Dr = 0.004631 S + 0.024349 PGA - 0.122712$		
σ_a	σ_b	σ_c
0.000302	0.016534	0.018878
σ_{Dr}	r^2	
0.096698	0.344365	

Tab. 7.1: coefficienti e deviazioni standard della regressione

$$Dr = a SI + b PGA + c.$$

Dr = densità relativa S = pendenza

$\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c$ = dev. st. dei coefficienti σ_{Dr} = dev. st. della densità

r^2 = coefficiente di determinazione

Log Dr = 0.056575 S + 0.670365 PGA - 4.565747		
σ_a	σ_b	σ_c
0.001035	0.056624	0.064653
σ_{Dr}	r^2	
0.331165	0.871825	

Tab.7.2 coefficienti e deviazioni standard della regressione

$$\text{Log Dr} = a S + b \text{PGA} + c.$$

Log Dr = 0.056455 S + 1.313365 Log PGA - 3.869751		
σ_a	σ_b	σ_c
0.001035	0.111238	0.038197
σ_{Dr}	r^2	
0.331378	0.871660	

Tab.7.3 coefficienti e deviazioni standard della regressione

$$\text{Log Dr} = a S + b \text{Log PGA} + c$$

Inserendo nelle regressioni come parametro sismico la PGV, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

Dr = 0.004393 S - 0.000500 PGV - 0.088390		
σ_a	σ_b	σ_c
0.000270	0.000834	0.013154
σ_{Dr}	r^2	
0.091198	0.318336	

Tab.7.4 coefficienti e deviazioni standard della regressione

$$\text{Dr} = a S + b \text{Log PGV} + c$$

Log Dr = 0.053514 S + 0.042175 PGV - 4.21021		
σ_a	σ_b	σ_c
0.001203	0.003720	0.058682
σ_{Dr}	r^2	
0.406839	0.776168	

Tab.7.5 coefficienti e deviazioni standard della regressione

$$\text{Log Dr} = a S + b \text{ PGV} + c$$

Log Dr = 0.053189 S + 0.847064 Log PGV - 4.585250		
σ_a	σ_b	σ_c
0.001222	0.083245	0.093219
σ_{Dr}	r^2	
0.414189	0.768006	

Tab.7.6 coefficienti e deviazioni standard della regressione

$$\text{Log Dr} = a S + b \text{ Log PGV} + c$$

Inserendo nelle regressioni come parametro sismico la AI, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

Dr = 0.005198 S + 0.180973 AI - 0.15026		
σ_a	σ_b	σ_c
0.000243	0.022723	0.010273
σ_{Dr}	r^2	
0.101898	0.311001	

Tab.7.7 coefficienti e deviazioni standard della regressione

$$\text{Dr} = a S + b \text{ AI} + c$$

Log Dr = 0.050943 S + 2.269782 AI - 4.058380		
σ_a	σ_b	σ_c
0.001022	0.095565	0.043205
σ_{Dr}	r^2	
0.428536	0.722322	

Tab.7.8 coefficienti e deviazioni standard della regressione

$$\text{Log Dr} = a S + b AI + c$$

Log Dr = 0.04918 S + 0.128935 Log AI - 3.39887		
σ_a	σ_b	σ_c
0.001172	0.010144	0.042217
σ_{Dr}	r^2	
0.493142	0.632286	

Tab.7.9 coefficienti e deviazioni standard della regressione

$$\text{Log Dr} = a S + b \text{Log AI} + c$$

Le regressioni che restituiscono un coefficiente di determinazione migliore sono quelle relative alla PGA, con il logaritmo della densità relativa come variabile dipendente. I rispettivi coefficienti di determinazione differiscono solo alla quarta cifra decimale; come relazione che meglio rappresenta i dati di partenza è stata scelta quella con la formulazione più semplice. Quindi quest'ultima è proposta nel presente studio come legge di suscettibilità alle frane di crollo:

$$\text{Log Dr} = 0.056575 S + 0.670365 \text{ PGA} - 4.565747 \quad (7.7)$$

Confrontando i dati reali con i dati teorici desunti dalla suddetta legge, si osserva che alle basse pendenze i dati sono maggiormente dispersi; questo accade perché nell'insieme dei dati inseriti nella regressione molte classi dei parametri a quelle pendenze non sono rappresentate, ossia in esse non era presente alcun pixel con frana. Questo induce a porre una soglia di validità della legge, fissata a 15° di pendenza (vedi Appendice H).

7.5.2 Mappa della suscettibilità alle frane di crollo.

Utilizzando la legge scelta per la suscettibilità è stata creata la relativa mappa raster per ogni cella di dimensioni 15x15 m.

I valori di densità relativa della mappa sono compresi tra 0.00006 e 0.50640; tale intervallo è stato diviso in sottointervalli corrispondenti alle seguenti classi di suscettibilità:

MOLTO BASSA:	< 0.0005
BASSA:	da 0.0005 a 0.001
MEDIA:	da 0.001 a 0.01
ALTA :	da 0.01 a 0.1
MOLTO ALTA:	> 0.1

Tab.7.11 Classi di suscettibilità e rispettivi ranges di densità relativa.

La mappa risultante è mostrata in fig7.3.

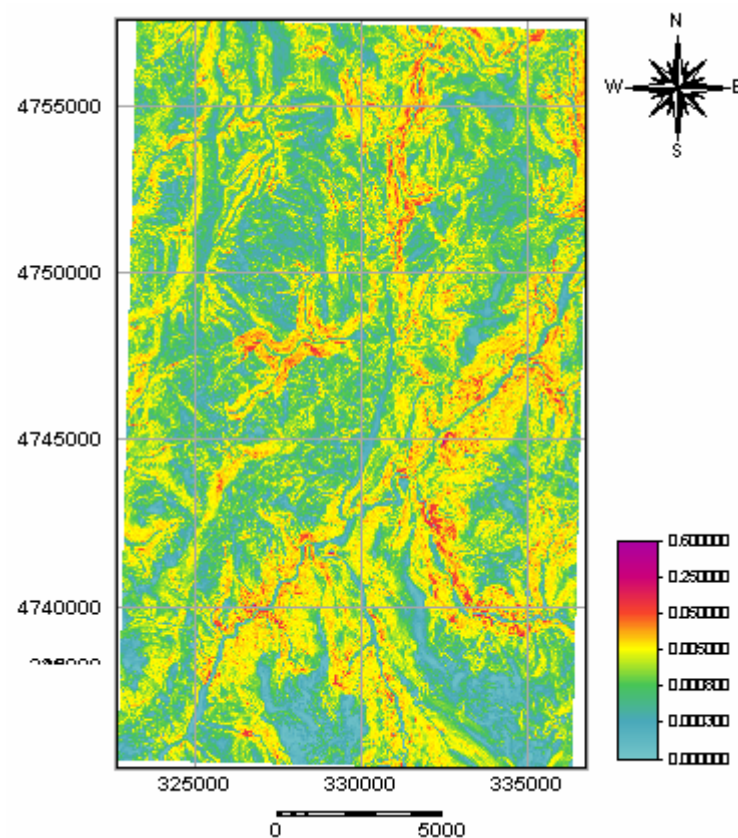


Fig.7.3 Mappa della suscettibilità alle frane di crollo.

Sovrapponendo alla mappa di suscettibilità quella delle frane si nota che esse ricadono quasi esclusivamente nelle classi "alta" e "molto alta", confermando la coerenza del lavoro svolto e la buona attendibilità dei dati raccolti.

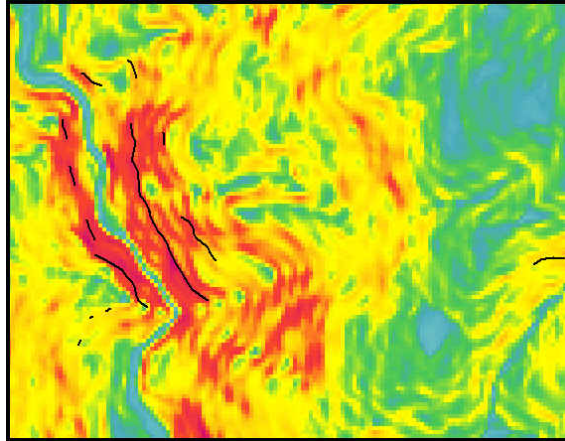


Fig.7.4 Particolare della mappa della suscettibilità alle frane di crollo alla quale sono state sovrapposte le zone di distacco.

7.5.3 Inserimento della geologia nella legge di suscettibilità.

Nella fase precedente dello studio non è stata inserita la geologia, in quanto legata alle pendenze. Ma volendo inserire nello studio un'ulteriore informazione riguardo al territorio analizzato, è stata definita un'altra legge di suscettibilità derivante da una regressione in cui è stata inclusa anche la geologia.

Le mappe aggiuntive sono quelle riguardanti le classi calcari, marne e depositi in forma binaria. Quindi la legge che ne risulta contiene tre nuovi coefficienti associati alle tre classi.

$$\text{Log Dr} = 0.054465 S + 0.232725 \text{ PGA} + 0.078275 C + 0.284243 M + 0.333245 D - 4.22097$$

C, M e D assumono il valore 1 dove c'è la presenza rispettivamente di Calcari, Marne e Depositi, altrimenti assumono il valore 0.

In tab.7.12 sono mostrate le deviazioni standard dei coefficienti associati ai parametri.

σ_a	σ_b	σ_c	σ_m	σ_d	σ_e
0.00106	0.117576	0.104395	0.106387	0.105598	0.113280
σ_{Dr}			r^2		
0.390572			0.780388		

Tab.7.12 Coefficienti e deviazioni standard dopo l'inserimento delle classi geologiche nella regressione.

Anche da questa legge è stata ricavata la mappa di suscettibilità alle frane di crollo, presentata in fig.7.5.

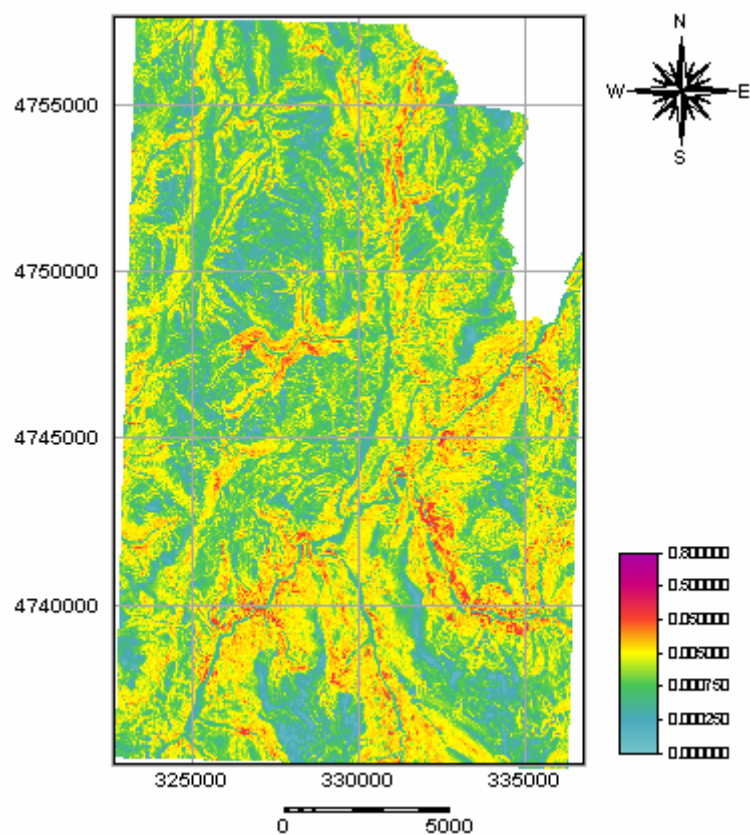


Fig.7.5 Mappa della suscettibilità alle frane di crollo dopo l'inserimento della geologia nel calcolo.

7.6 Conclusioni.

Lo studio dei fenomeni franosi avvenuti a seguito della scossa del 14 ottobre 1997 si è conclusa con la produzione di una mappa della suscettibilità alle frane di crollo. Il metodo condotto non era mai stato applicato a questo tipo di frane in Italia, sia perché la tecnologia informatica non era ancora adatta ad elaborare dati georeferenziati e quindi si potevano solo fornire indicazioni qualitative (vedi caso del Friuli) ed inoltre non erano disponibili banche dati sufficienti sugli effetti indotti dai terremoti passati.

La mappa prodotta ha il limite di riferirsi ad un terremoto specifico, ossia con una sorgente sismica ed una magnitudo ben definite. La mappa riguarda quindi un solo evento, in quanto modificando i due dati suddetti è possibile creare scenari diversi, anche in zone diverse da quella studiata.

Il lavoro svolto ha evidenziato innanzitutto l'importanza della raccolta dei dati, in quanto disponendo di informazioni dettagliate riferite al territorio è possibile in breve tempo, con l'utilizzo dei SIT, redarre una mappa come quella del presente studio. Fondamentale è il modello digitale del terreno da cui sono state ricavate le pendenze, fortemente correlate alle frane, ma anche i dati sismici; infatti invece della legge proposta si potrebbe applicare ad esempio una legge di attenuazione migliore, oppure considerare un parametro sismico che rappresenti meglio il terremoto.

In ogni caso, lo studio proposto ha evidenziato come le frane di crollo siano ben correlate a certi parametri; questo, in un'ottica di gestione e pianificazione del territorio, pone l'accento sulla prevedibilità di questo tipo di frane. Infatti non è solo necessario prevedere un terremoto nello spazio e nel tempo, ma anche gli effetti che un terremoto può causare, in modo da poter ridurre i rischi per l'uomo. Spesso le frane indotte da un terremoto non sono tenute in considerazione nella pianificazione urbanistica e questo porta a costruire in zone che potrebbero essere coinvolte da un evento catastrofico, causante danni e vittime; ne è un esempio il terremoto del Friuli, così come il più recente in San Salvador.

Uno sviluppo futuro dello studio necessiterebbe una banca dati relativa ad un terremoto successivo, in modo da validare la legge proposta.

CAPITOLO VIII

Valutazione del danneggiamento agli edifici

8.1 Introduzione.

L'applicazione riguardante i danni agli edifici è stata effettuata a partire dai danni osservati sulle foto aeree. I dati relativi al danneggiamento sono stati confrontati con i dati del censimento della popolazione (ISTAT, 1991), relativi agli edifici residenziali. L'unione di questi due insiemi di dati ha permesso di produrre le mappe del danneggiamento, sia a livello comunale che a livello di sezioni di censimento. Inoltre, è stata prodotta la mappa della vulnerabilità relativa a sei Comuni dell'Umbria, disponendo dei valori di vulnerabilità delle schede di 1° e 2° livello del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT), relativi a singoli edifici per un campione individuato nella zona.

Infine il confronto tra il danno e la vulnerabilità ha permesso di individuare possibili aree soggette a fenomeni di amplificazione delle onde sismiche.

8.2 Descrizione dei dati ISTAT.

Il riferimento di base per l'analisi riguardante il danneggiamento agli edifici è l'insieme dei dati contenuti nel "*13° censimento generale della popolazione, 1991*" (ISTAT, 1991). Il materiale contenuto in questo insieme di dati consiste sia in mappe vettoriali georeferenziate in formato digitale che in tabelle di attributi in cui sono contenute le caratteristiche di dettaglio di edifici pubblici e residenziali e della popolazione.

Le mappe vettoriali riguardano i limiti comunali e le sezioni di censimento presenti in ogni località; ad ogni sezione di censimento è associata una tabella di attributi in cui sono contenuti alcuni campi, tra cui:

"cod-amm-sez" (identificativo della sezione di censimento, formato da Provincia, Comune e n° della sezione)

"n-abit" (numero di appartamenti della sezione di censimento)

"n-edif" (numero di edifici della sezione di censimento)

Dai dati ISTAT si ricavano altre informazioni specifiche riguardanti ogni singolo edificio, le quali suddividono il patrimonio edilizio nelle seguenti classi, come indicato in tab.8.1:

Classi tipologiche degli edifici
<i>1 - Tipologia strutturale</i>
Edifici in muratura
Edifici in cemento armato
Edifici su pilotis
Altre tipologie

2 - Età dell'edificio
Antecedente al 1919
Tra il 1919 e il 1945
Tra il 1946 e il 1960
Tra il 1961 e il 1971
Tra il 1972 e il 1981
Successiva al 1981
3 - Numero di piani
1 o 2 piani
3, 4 o 5 piani
Più di 6 piani
4 - Contesto strutturale
Edificio isolato
Edificio aggregato

Tab.8.1 Classi tipologiche degli edifici (ISTAT, 1991)

Alle classi indicate nella tab.8.1 è stato aggiunto in un lavoro precedente (Meroni et al., 1999) lo "stato di manutenzione" degli edifici, suddiviso in "buono" e "cattivo" stato.

Lo stato di manutenzione , importante ai fini del comportamento sismico delle costruzioni, deriva dall'efficienza degli impianti all'interno degli edifici, informazione disaggregata presente nei dati ISTAT (1991).

8.3 Valutazione della vulnerabilità.

I valori di vulnerabilità degli edifici inseriti nello studio sono stati tratti dal metodo adottato dal GNDT, proposto da Benedetti e Petrini (1984). La procedura si basa sulla raccolta di informazioni relative agli elementi costruttivi di un edificio, catalogate tramite schede.

La tipologia delle schede utilizzate appartiene alle "Schede di 1° e 2° livello del GNDT per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici", raccolte a partire dal 1983: queste sono state redatte in modo da contenere informazioni riguardo all'età dell'edificio, allo stato delle finiture degli impianti, alla tipologia strutturale, all'estensione e al livello del danno nel caso si sia verificato un evento sismico, .

A partire dalle schede si calcolano i valori di vulnerabilità di ogni tipologia di edificio. La

vulnerabilità è assegnata in modo convenzionale, utilizzando un indice che varia tra 0 (corrispondente agli edifici che rispettano le normative sismiche vigenti) a 100 (corrispondente agli edifici scadenti), sulla base dei sopracitati parametri. Ad ogni parametro "i" sono associate quattro classi, contenenti un valore "p_i" crescente dalla classe migliore alla peggiore e un peso "w_i".

L'indice di vulnerabilità è definito come somma pesata dei punteggi assegnati ad ogni parametro:

$$V = \sum p_i w_i \quad (8.1)$$

Grazie alla raccolta dei dati ISTAT e GNDT, è stato possibile adottare la procedura di Meroni et al.(1999), utile per valutare la vulnerabilità degli edifici su aree estese.

L'approccio parte dal raggruppamento degli edifici nelle poche classi desumibili dai dati ISTAT (tipologia strutturale, età, numero di piani e stato di manutenzione). Successivamente le schede GNDT sono riorganizzate secondo le stesse classi, in modo da poter confrontare i due insiemi di dati.

Per ogni classe vengono analizzate statisticamente le distribuzioni degli indici di vulnerabilità. Le analisi sono regionalizzate, in quanto, non disponendo di schede relative alla regione Umbria, sono state considerate le schede di rilievo di vulnerabilità delle Province di Ancona, Macerata, Ascoli Piceno e L'Aquila; la scelta deriva dall'osservazione che in tali Province, soprattutto nell'entroterra, le tecniche costruttive sono omogenee e molto simili a quelle umbre. Questa assunzione riguarda esclusivamente gli edifici in muratura.

Le forme funzionali che più si adattano ai dati sono la distribuzione Gamma (con parametro $a_r > 1$), o la distribuzione di Weibull (con parametro $a_w > 1$), o una combinazione delle due (Meroni et al., 1999).

In questo modo per ogni tipologia di edificio sono stati tracciati due grafici, rappresentanti la distribuzione della densità di probabilità della vulnerabilità, secondo le funzioni Gamma e Weibull. La fig.8.1 mostra un esempio dei grafici, consultabili in Appendice H.

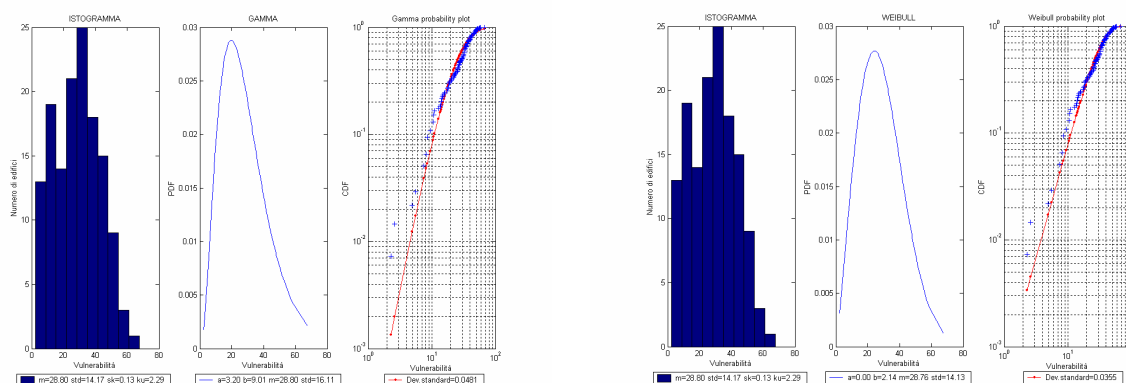


Fig.8.1 Grafici relativi alla vulnerabilità degli edifici in muratura, in buono stato di manutenzione, di 1 o 2 piani, costruiti antecedentemente al 1919.

E' stata ricavata la distribuzione della densità di probabilità della vulnerabilità, con la relativa media e deviazione standard, sia per la distribuzione Gamma che per la Weibull. I valori derivanti dalle due distribuzioni non danno differenze significative, ma dovendo scegliere caso per caso una delle due, le distribuzioni teoriche sono state confrontate con i valori cumulati dei dati reali, in modo da poter confrontare la deviazione standard dei residui (differenza tra il dato reale e quello teorico). Sono stati così ottenuti i valori medi della vulnerabilità per ogni classe di edificio dei dati ISTAT .

La tab.8.2 mostra i risultati ottenuti per gli edifici in muratura.

	Edifici con 1 o 2 piani	
	Buono stato di manutenzione	Cattivo stato di manutenzione
	Vuln. Media	Vuln. Media
Pre 1919	28.76	45.16
1919-1945	21.79	27.32
1946-1960	13.85	18.57
1961-1971	12.83	14.96
1972-1981	10.77	14.98
Post 1981	10.59	14.98

Tab. 8.2 Valori della vulnerabilità media per ogni tipologia di edificio.

	Edifici con più di 3 piani	
	Buono stato di manutenzione	Cattivo stato di manutenzione
	Vuln. Media	Vul. Media
Pre 1919	32.99	43.95
1919-1945	21.54	25.97
1946-1960	17.21	21.12
1961-1971	15.60	18.21
1972-1981	13.40	17.2
Post 1981	13.40	10.51

(continua tab.8.2)

Per gli edifici in cemento armato e pilotis non erano disponibili dati di schede GNDT; così sono stati considerati i valori di vulnerabilità riguardanti medie italiane, desunte da un precedente lavoro (Meroni, 2000) e mostrati in tab.8.3.

Edifici in cemento armato	
	Vuln.media
1945-1960	35.7
1961-1971	38.4
Post 1972	32.6

Tab.8.3 Valori delle medie italiane di vulnerabilità per gli edifici in cemento armato e pilotis.

L'ultima fase del procedimento consiste nel calcolo di un indice medio di vulnerabilità per ogni sezione di censimento tra quelle considerate nello studio, pesando i valori di vulnerabilità di ogni classe sul volume degli edifici presenti in quella classe. Il calcolo è il seguente:

$$V = [\Sigma (Vol)_i * (V_m)_i] / Vol_{tot} \quad (8.2)$$

dove V è la vulnerabilità media della sezione di censimento, $(Vol)_i$ è il volume di una classe di edifici, $(V_m)_i$ è la vulnerabilità media calcolata per quella classe, Vol_{tot} è il volume totale degli edifici in quella sezione.

Infine i valori ottenuti sono visualizzati attraverso la mappa della vulnerabilità per le sezioni di censimento dei Comuni di Sellano, Foligno, Norcia, Preci, Campello sul Clitunno e Vallo di Nera (Fig.8.2, 8.3).

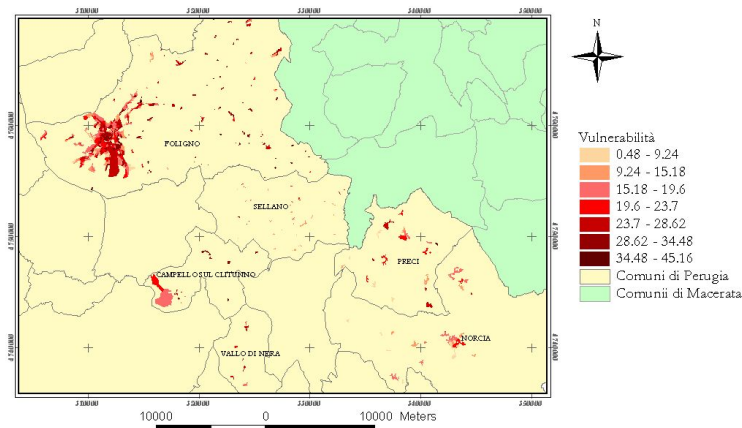


Fig.8.2 Mappa della vulnerabilità delle sezioni di censimento.

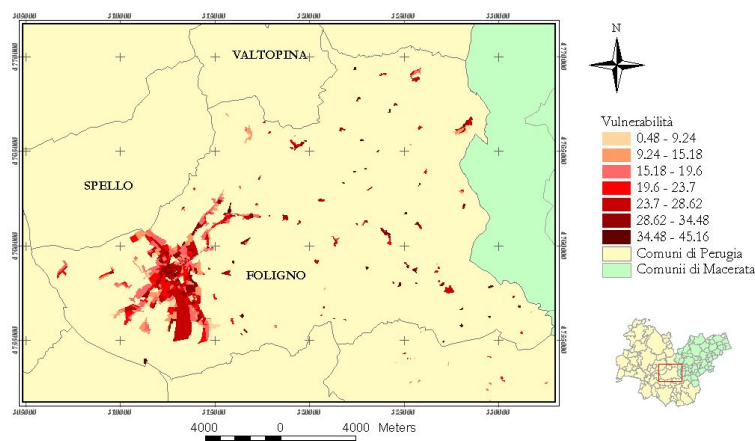


Fig.8.3 Particolare della mappa della vulnerabilità di fig.8.2, relativo al Comune di Foligno.

8.4 Descrizione dell'area di studio.

Come mostrato nel capitolo IV, sono stati rilevati da fotointerpretazione i danni di un'area che si estende dal lato nord occidentale dell'Umbria, a partire dal Comune di Gualdo Tadino fino al Comune di Vallo di Nera a SSE, includendo anche alcuni Comuni della Provincia di Macerata, tra cui Serravalle del Chienti e Visso.

Per tutta l'area è stato calcolato il danneggiamento degli edifici sia per ogni Comune che per ogni sezione di censimento, mentre i valori di vulnerabilità da confrontare con lo stesso danneggiamento hanno riguardato una sottozona campione dei soli Comuni di Sellano, Foligno, Norcia, Preci, Vallo di Nera e Campello sul Clitunno.

8.5 Mappe del danneggiamento agli edifici.

Scopo dell'analisi riguardante i danni agli edifici era di valutare, in un tempo relativamente breve, la gravità del danneggiamento. Per questo, sono state seguite due strade: la prima ha coinvolto il calcolo delle percentuali di edifici danneggiati sul totale, "pesate" secondo la gravità del danno; la seconda ha riguardato i volumi di danneggiamento, in modo che essi potessero essere confrontati con i valori di vulnerabilità, indicando eventuali fenomeni di amplificazione.

Le percentuali o i volumi danneggiati sono stati calcolati a livello di sezione di censimento; inoltre i volumi sono stati valutati anche a livello comunale.

Avvalendosi dei SIT, sono state sovrapposte le mappe dei danni osservati e delle sezioni di censimento ISTAT (1991).

Le 4 classi dei danni osservati (già descritte nel Capitolo IV) sono state identificate da un indice di danno che varia tra 0 e 100, desunto dalla "Scala di danno GSD" (Grimaz et al. 1996; vedi Appendice G). I valori sono mostrati nella tab.8.4.

classe	descrizione	indice danno
1	Lievi danni al tetto	40
2	Gravi danni al tetto	60
3	Crollo parziale delle pareti, con crollo totale o parziale del tetto	75
4	Crollo totale	95

Tab.8.4 Valori dell'indice di danno associato alle classi di danno.

Per quel che riguarda la stima degli edifici danneggiati, sono stati restituiti due parametri.

Il primo parametro si riferisce al volume assoluto di costruito danneggiato.

Dai dati ISTAT si può ottenere la superficie totale di costruito di ogni sezione di censimento (in metri quadrati), rilevabile tramite il dato espresso per ogni appartamento, ricavato dalle schede. La superficie totale è stata a sua volta moltiplicata per 3 m (considerata come altezza standard di un'abitazione), ottenendo così il volume totale di costruito in una sezione. Considerando che nella zona di studio sono presenti in prevalenza località urbane di modeste dimensioni, in cui gli edifici sono in prevalenza simili e poco elevati, si è assunto come volume medio di ogni edificio il volume totale diviso per il numero di edifici.

Disponendo dei volumi medi per ogni sezione di censimento, si è potuti giungere al volume totale danneggiato:

$$V_{Di} = V_m * E_i * p_i \quad (8.3)$$

$$V_D = \sum V_{Di} \quad (8.4)$$

dove V_{Di} è il volume danneggiato della classe “i” di danno, V_m è il volume medio di un edificio, E_i è il numero di edifici con danno di classe “i”, p_i è l'indice di danno della classe del danno stesso e V_D è il volume totale danneggiato in una sezione.

Il valore di V_D ottenuto è stato utilizzato per produrre la mappa del danneggiamento relativo alle sezioni di censimento ISTAT, come mostrato nelle fig.8.4.

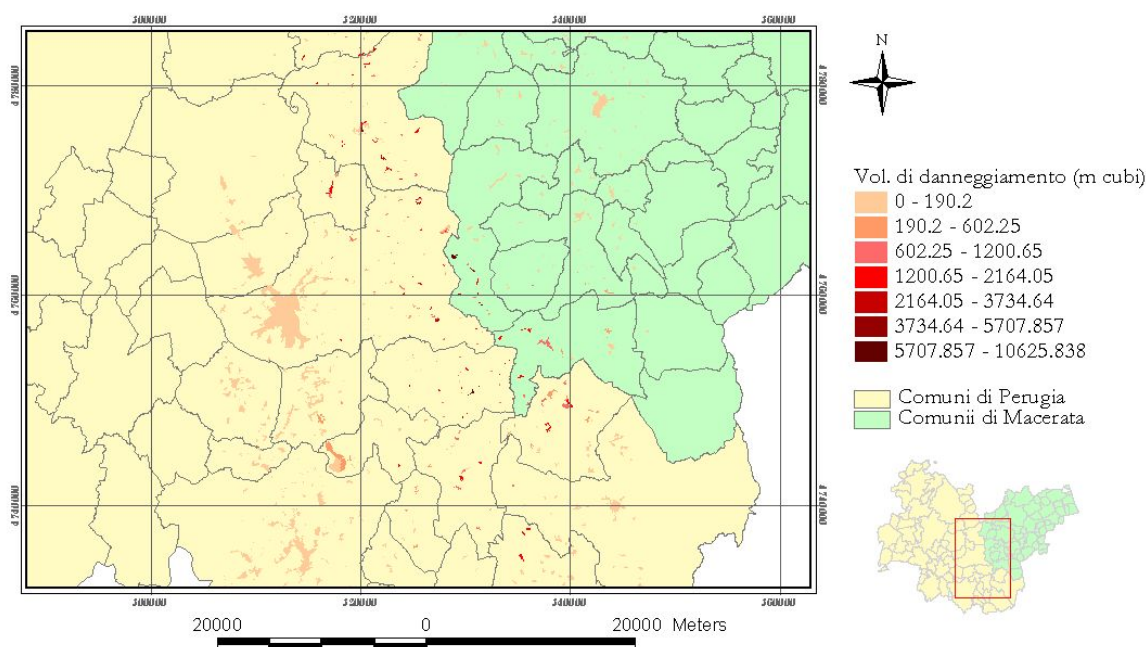


Fig.8.4 Mappa del danneggiamento delle sezioni di censimento (volumi assoluti).

I dati ISTAT (1991), oltre a contenere le informazioni sulle sezioni di censimento, forniscono anche il numero delle cosiddette “case sparse”, ossia quegli edifici staccati dai centri urbani e isolati, non ricadenti all'interno delle sezioni di censimento che identificano il nucleo urbano del Comune. La non perfetta sovrapposizione tra le mappe del danneggiamento e le sezioni di censimento ha portato a degli errori di stima di danni per quanto riguarda quest'ultima categoria. Essendo le case sparse di un Comune un numero esiguo, anche pochi edifici danneggiati incidono significativamente sul calcolo delle percentuali e dei volumi di danneggiamento di questa categoria di costruzioni.

Per non perdere l'informazione delle case sparse si è pensato di valutare il danneggiamento a scala comunale, in modo da racchiudere tutti gli edifici di un Comune in un unico calcolo;

inoltre il livello comunale è anche importante per indirizzare in prima battuta eventuali finanziamenti per la ricostruzione. La mappa del danneggiamento a livello comunale è mostrata in fig.8.5.

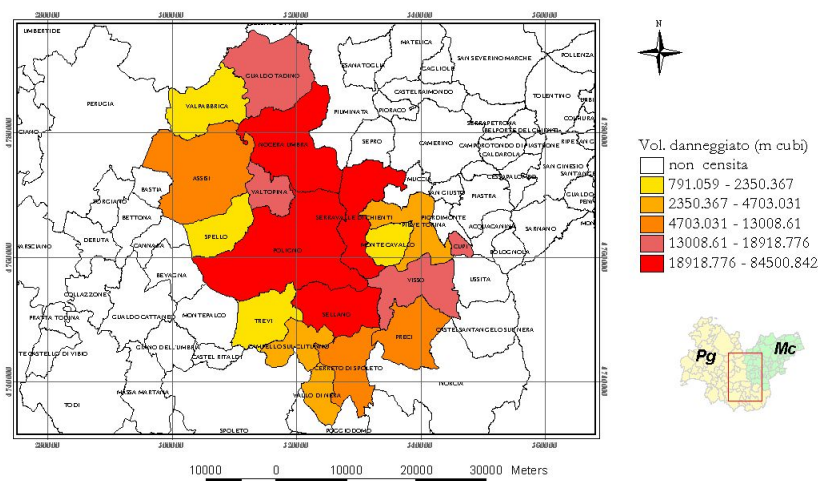


Fig.8.5 Mappa del danneggiamento dei Comuni (volumi assoluti).

Il secondo parametro calcolato permette di valutare la gravità del danno in una sezione di censimento, come percentuale sul totale del volume del costruito in una sezione.

Essendo:

$$D_{\text{tot}} = \sum (E_i * p_i) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (8.5)$$

dove D_{tot} è il danneggiamento totale osservato in una sezione di censimento, E_i e p_i sono i parametri della (8.3), la percentuale di danneggiamento (D_n) in una sezione di censimento (coincidente con la percentuale di volume danneggiato) risulta:

$$D_n = D_{\text{tot}} / E_{\text{tot}} \quad (8.3)$$

in cui E_{tot} è il numero totale di edifici in una sezione.

In fig.8.6 è mostrata la mappa relativa alle percentuali di danneggiamento, a livello di sezioni di censimento.

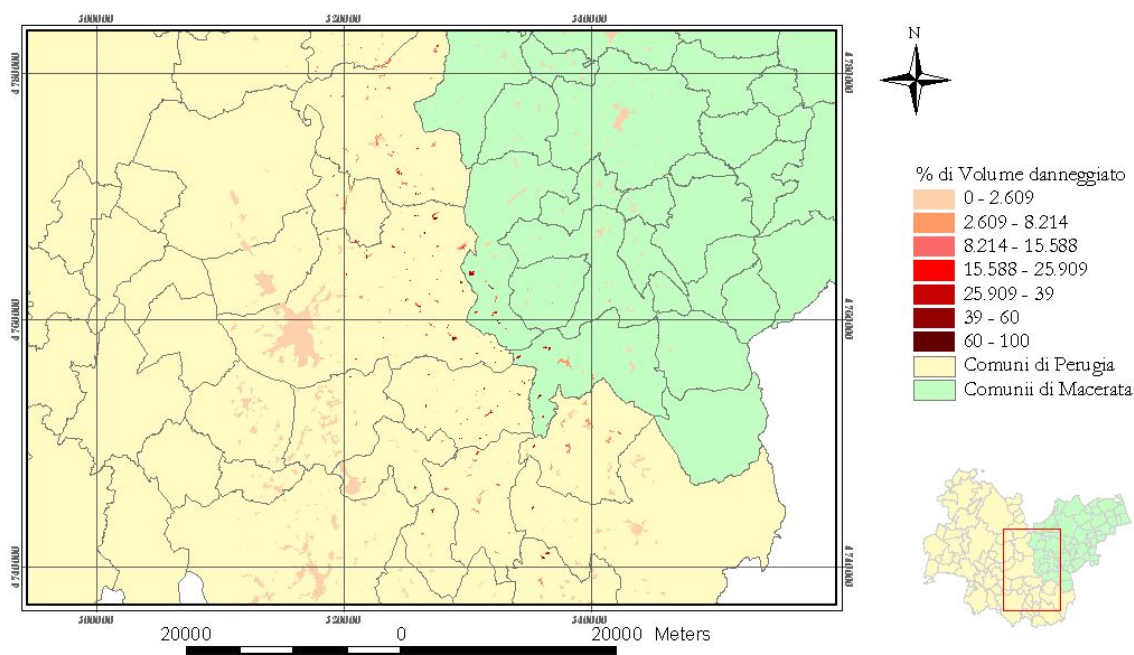


Fig.8.6 Percentuale sul totale di danneggiamento a livello di sezioni di censimento

Da queste mappe si traggono utili informazioni sui Comuni maggiormente danneggiati, che in questo caso risultano essere Sellano, Foligno, Nocera Umbra e Serravalle del Chienti. Dalla visione comunale si può passare al livello di sezioni di censimento, individuando quali siano le località più colpite. Disponendo di un tale quadro informativo, si possono in prima battuta indirizzare le priorità di intervento per la ricostruzione. Inoltre il dato volumetrico assoluto restituisce una prima indicazione quantitativa relativa al danneggiamento; questa può servire per valutare in prima analisi il valore del patrimonio edilizio distrutto, in modo da fornire indicazioni su un'eventuale assegnazione di finanziamenti alle amministrazioni locali.

Il danneggiamento calcolato con il metodo proposto potrebbe essere confrontato direttamente con quello risultante dalle schede di agibilità; purtroppo, per la zona studiata, sono state individuate delle ridondanze nei dati relativi a tali schede, dovute, si presume, alle ripetute spedizioni nelle località colpite, effettuate da operatori differenti che hanno osservato i danni di edifici già visionati. Infatti, per alcune sezioni di censimento, dalle schede risultavano molti più edifici di quelli realmente esistenti. Mancando nelle schede i riferimenti ad ogni singolo edificio, che ne rende difficoltosa la localizzazione, non è stato possibile correggere gli errori di ripetizione delle osservazioni.

8.6 Individuazione di possibili zone di amplificazione.

Il danno arrecato da un sisma alle costruzioni antropiche non è dovuto solo alla vulnerabilità che queste possiedono nei confronti dello scuotimento del terreno. Un altro fenomeno importante da valutare è l'amplificazione delle onde sismiche. Infatti è possibile che edifici, considerati poco vulnerabili, subiscano comunque dei danni.

Per valutare le zone e i terreni in cui si verificano fenomeni di amplificazione, vengono svolti studi di microzonazione sismica. La microzonazione è uno studio di dettaglio e quindi difficilmente può essere svolta su aree vaste. Per le zone colpite dal sisma del 1997 la Protezione Civile ha finanziato uno studio di microzonazione delle aree maggiormente danneggiate (Pergalani et al., 1999). Tale indagine serviva per fornire dei parametri per la ricostruzione post - sismica o la ristrutturazione di edifici danneggiati. Dato che l'indagine si è svolta in tempi esigui, non è stato possibile approfondire con dettaglio le caratteristiche di terreni delle zone maggiormente danneggiate. L'analisi è stata condotta con il solo ausilio di informazioni geologiche e geomorfologiche di superficie e adottando parametri geotecnici dinamici, provenienti da letteratura. Per una verifica dell'attendibilità di tali indagini, si è pensato di effettuare un confronto tra la vulnerabilità degli edifici ed il danno effettivo, dati non disponibili al momento della microzonazione. Sono stati scelti alcuni Comuni campione: Foligno, Sellano, Preci, Norcia, Campello sul Clitunno e Vallo di Nera. I fattori di amplificazione stimati dallo studio "Microzonazione sismica speditiva in Umbria", della Regione Umbria sono stati assegnati a ciascuna sezione di censimento.

Quindi come possibili zone di amplificazione bisogna individuare quelle che hanno subito gravi danni, pur avendo una bassa vulnerabilità, dato che la PGA si può assumere uniforme per i comuni esaminati.

In prima approssimazione, le mappe del danno, che indicano la percentuale di volume danneggiato in una sezione di censimento, e della vulnerabilità media sono state riclassificate in modo da ottenere delle classi qualitative, come mostrato nelle tab.8.5 e 8.6. Esistono metodi più sofisticati per la determinazione del danno (Grimaz, 1997), ma non sono state utilizzate in questa prima fase.

DANNO			
percentuale	0 - 30	30 - 60	60 - 100
classe	Basso	Medio	Alto

Tab.8.5 Classi di danno per l'individuazione di possibili zone di amplificazione.

VULNERABILITA'		
valore	0 -25	25 - 50
classe	Bassa	Media

Tab.8.6 Classi di vulnerabilità per l'individuazione di possibili zone di amplificazione.

La vulnerabilità è stata suddivisa nelle sole classi "bassa" e "alta" in quanto i valori sono desunti da vulnerabilità medie per ogni sezione di censimento che compattano i risultati verso valori medio bassi.

Alle varie combinazioni delle classi di danno e vulnerabilità sono stati associati dei fattori soggettivi in un range da 1 a 4, indicanti in senso crescente la possibile amplificazione. La matrice risultante è mostrata in tab.8.7.

		VULNERABILITA'	
DANNO		Bassa	Media
	Basso	1	1
	Medio	2.5	2
	Alto	4	3.5

Tab.8.7 Matrice delle combinazioni tra classi di danno e vulnerabilità.

Fattori: 1: nessuna amplificazione; 2: bassa amplificazione;

2.5: medio - bassa amplificazione; 3.5: medio - alta amplificazione;

4:alta amplificazione.

La matrice è stata applicata attraverso il SIT alle mappe riclassificate del danno e della vulnerabilità, in modo da ottenere una mappa dei fattori di amplificazione associati alle sezioni di censimento studiate. Questo ha permesso aggiungere i risultati nella tabella degli attributi ISTAT in cui precedentemente erano stati inseriti i fattori di amplificazione derivanti dalla microzonazione. Infine le zone individuate come possibili aree di amplificazione sono state confrontate con i risultati dal lavoro di microzonazione speditiva, in modo da validare il procedimento.

La corrispondenza tra le zone di amplificazione desunte dai due studi non sempre coincide; questo potrebbe principalmente derivare dal fatto che le aree analizzate della microzonazione abbiano influenzato le valutazioni, essendo le più danneggiate.

8.7 Conclusioni.

L'analisi relativa al danneggiamento degli edifici ha prodotto vari risultati. In primo luogo è stato possibile, in un tempo relativamente breve (pochi mesi), redarre le mappe del danneggiamento relativo all'intera area colpita dal sisma. Il metodo proposto possiede la caratteristica di valutare il danneggiamento omogeneamente sul territorio, considerando poche e distinte classi di danno, facilmente individuali per fotointerpretazione. Il materiale necessario è rappresentato dalle foto aeree di un volo effettuato appena dopo l'evento e dai dati ISTAT relativi agli edifici residenziali. Anche se non si possono fornire dei valori quantitativi precisi, in quanto si sottostimano i danni minori, i risultati dello studio possono essere comunque utilizzati per individuare le priorità di intervento e valutare una prima assegnazione dei finanziamenti per la ricostruzione.

Un'applicazione futura dello studio sarà quella di confrontare il danno osservato con il danno valutato attraverso le curve di fragilità, derivanti dalla vulnerabilità degli edifici e dai valori di accelerazione al suolo (Grimaz, 1997). Per poter far questo non sono sufficienti le vulnerabilità medie, ma è necessario considerare l'intera forma delle distribuzioni di vulnerabilità per ogni classe di edificato, rilevato tramite dati ISTAT. Il confronto tra mappa della vulnerabilità e mappa dei danni è servito per individuare possibili zone di amplificazione, su cui potrebbero essere indirizzate in tempi brevi gli studi di microzonazione sismica. Spesso i risultati di microzonazione sono prodotti in tempi lunghi, quando la ricostruzione è già stata avviata; quindi possono essere utilizzati esclusivamente per la ricerca. Lo scopo del metodo proposto nel presente studio è proprio quello di ridurre i tempi di indagine, in modo da indicare le aree sulle quali compiere la microzonazione, senza che vengano analizzati siti nei quali è possibile escludere effetti di amplificazione, con la conseguente riduzione dei costi delle operazioni e di errori di valutazione.

APPENDICE A

Softwares utilizzati nel presente studio

A.1 Arc/Info

Questo software è stato utilizzato soprattutto nella fase di creazione del DEM.

Si tratta di un software suddiviso in diversi moduli, ciascuno dei quali permette diverse applicazioni.

Il modulo **ARC** serve per importare ed esportare dati, per effettuare trasformazioni da un formato ad un altro e per effettuare tutte le operazioni di carattere generale su una mappa, ad esempio la georeferenziazione e la definizione di un sistema di coordinate.

Il modulo **ARCEDIT** è utilizzato per la manipolazione dei dati: esso consente infatti di modificare gli elementi di una mappa e gli attributi ad essa collegati. Inoltre è il modulo utilizzato per l'input dei dati attraverso la digitalizzazione. Oltre all'individuazione di errori, esso è utile per la costruzione delle relazioni topologiche fra i vari elementi di una mappa.

Il modulo **ARCPlot** permette invece esclusivamente la visualizzazione delle mappe mediante una serie di comandi da digitare che lo rendono uno strumento poco "user friendly".

INFO è il modulo che gestisce l'informazione legata ai dati spaziali rappresentati nelle mappe.

TABLES è un modulo analogo all'Info che permette la gestione di data base di attributi ma è più "user friendly".

GRID è il modulo utilizzato per i dati raster; con esso sono condotte tutte le operazioni di calcolo fra mappe raster comprese le operazioni di filtro e il calcolo di parametri del DEM (quali angolo ed esposizione dei versanti).

Esistono poi altri moduli che non sono stati utilizzati, quali **ARCSCAN**, **ARCPRESS**, **REGION** o **LIBRARIAN**.

Gli elementi che costituiscono una mappa di ArcInfo sono:

- archi
- punti
- nodi
- labels
- poligoni
- tics

Gli archi sono linee definite da un set ordinato di coordinate (x, y) che costituiscono i vertici. Gli archi possono rappresentare su una mappa degli elementi lineari oppure i confini

di poligoni.

I punti rappresentano su una mappa delle entità definite attraverso coppie di coordinate (x, y).

I nodi costituiscono i punti di inizio e fine di un arco oppure il punto in cui si connettono due o più archi.

Le labels sono punti definiti ciascuno da una coppia di coordinate (x, y) e assegnano ai poligoni dei codici di identificazione.

I poligoni sono aree della mappa delimitate da archi.

I tic sono punti di controllo di tipo geografico utilizzati per georiferire una mappa o per trasformarne le coordinate.

Ad ogni mappa è associata una tabella di attributi (modulo Info); il codice identificatore di ogni elemento della mappa permette il collegamento univoco con il rispettivo record nella tabella di attributi, inoltre esso permette di associare ad ogni elemento le corrispondenti coordinate che sono registrate in un file separato. Una tabella associata ad una mappa di archi è un file di estensione *.AAT (arc attribute tables); per una mappa di poligoni esiste invece una tabella *.PAT (polygon attribute table); per i nodi una *.NAT (node attribute table) e per i punti una *.PAT (point attribute table); da ciò si capisce che punti e poligoni non possono stare sulla stessa mappa. Se si vogliono aggiungere degli attributi è necessario costruire un altro file di dati nel modulo info, collegato alla tabella standard, oppure aggiungere altre colonne alle AAT, PAT, NAT. Le tabelle definiscono la tipologia di una mappa; esse contengono i dati necessari per costruire relazioni topologiche di diverso tipo. Ad esempio, in una AAT sono indicati i codici relativi ai nodi che delimitano gli archi, i codici dei poligoni individuati dagli archi, la lunghezza dell'arco, i numeri interni degli archi e i codici dati dall'utente (es. la quota assegnata alle curve di livello). In una PAT vengono indicati invece: area e perimetro dei poligoni, numero interno dei poligoni e codici dati dall'utente.

Arc/Info permette una gran moltitudine di operazioni vettoriali. Tuttavia le analisi condotte in questo studio hanno comportato l'utilizzo di mappe in formato raster e per questo motivo si è preferito usare per la maggior parte delle applicazioni il software Ilwis.

A.2 Ilwis

Ilwis è l'acronimo di “ Integrated Land and Water Information System “, è un SIT sviluppato dall'International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) che permette di immagazzinare, gestire, analizzare e presentare dati geografici e di elaborare immagini. Ilwis ha una struttura orientata agli oggetti, questi sono suddivisi in tre diverse classi:

- Oggetti contenenti dati
- Oggetti di servizio
- Oggetti speciali

Gli oggetti contenenti dati sono le **mappe**, sia raster che vettoriali e le **tabelle**.

Gli oggetti di servizio contengono informazioni che servono per strutturare, rappresentare e georiferire i dati, essi vengono pertanto utilizzati dagli oggetti contenenti dati. **Domains**, **rappresentazioni**, **georeferences** e **coordinate systems** sono oggetti di servizio.

Tra gli oggetti speciali, alcuni contengono informazioni aggiuntive di tipo statistico, come gli **istogrammi**, altri sono dei mezzi che permettono di effettuare calcoli ed elaborazioni dei dati, tra questi figurano gli **scripts**, i **filtri** e le **funzioni**.

I dati di tipo spaziale sono rappresentati dalle mappe; come in ogni SIT, anche in Ilwis l'informazione spaziale può esser rappresentata mediante due modelli diversi: il modello vettoriale e quello raster: nel primo i dati vengono rappresentati come punti, linee e poligoni, nel secondo come valori attribuiti a celle quadrate.

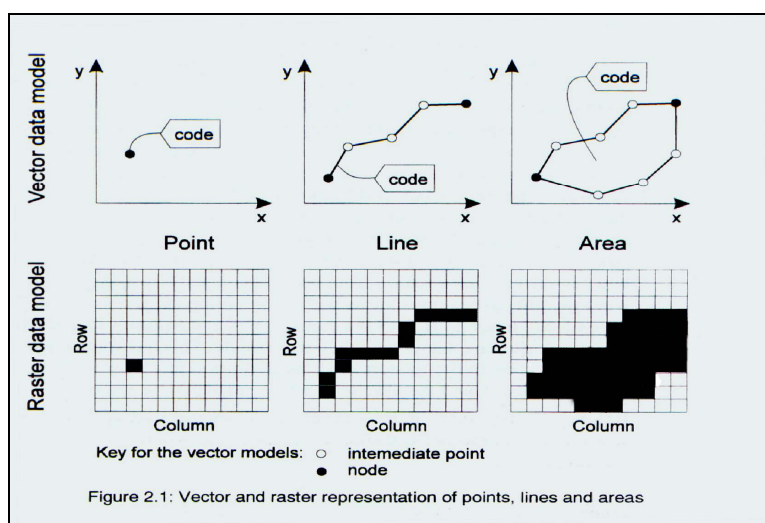


Fig A.2.1 dati in struttura raster e vettoriale, da Burrough “Principles of Geographical Information System”

Ad ogni mappa è associato un **domain** che definisce e contiene le informazioni che si possono trovare in una mappa o in una colonna della tabella; in Ilwis si distinguono tre diversi domain: **class**, **value**, e **ID**.

Un “class domain” consiste di una lista di nomi o codici che definiscono delle classi; se una mappa ha un “class domain”, punti, linee, poligoni o pixels sono codificati per mezzo dei nomi o dei codici; elementi a cui non è associato un codice sono considerati indefiniti. Ad esempio una mappa dell'idrografia può avere un domain class che permette di definire gli elementi come fiumi, torrenti, laghi etc.

Se invece agli elementi di una mappa sono associati dei valori, il domain della mappa è di tipo “value” e definisce il range dei valori possibili e la precisione.

Un domain “ID” è utilizzato se ogni elemento della mappa è definito da un nome o codice univoco; oggetti senza identificativo sono considerati indefiniti.

Gli attributi relativi alle entità spaziali sono contenuti nelle tabelle; ciò che permette di stabilire una relazione fra una mappa e una tabella è il domain.

Per esser collegata ad una mappa, la tabella deve avere lo stesso domain della mappa.

La tabella viene definita “attribute table”. Soltanto mappe con domain “class” o “ID” possono avere “attribute tables” perciò queste possono avere soltanto domain “class” o “ID”. Ogni tabella contiene un certo numero di colonne ognuna delle quali ha un proprio domain che può essere anche “value”.

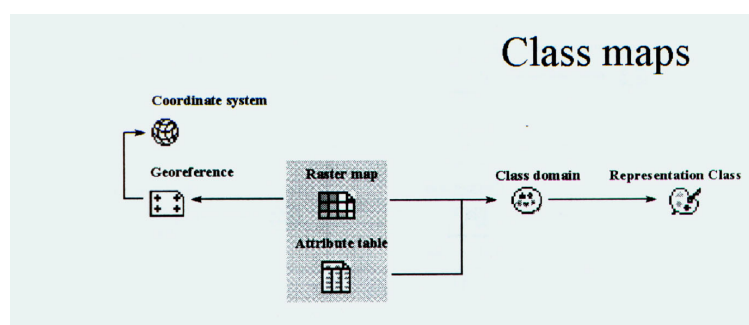


Fig A.2.2 struttura dei dati relativi ad una mappa con domain “class”

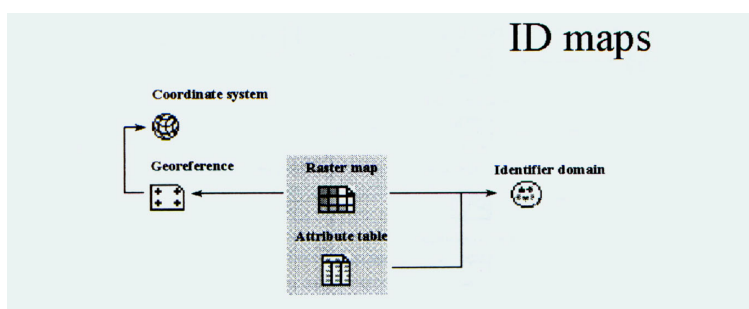


Fig A.2.3 struttura dei dati relativi ad una mappa con domain “ID”

Una “ rappresentazione “ definisce la modalità con cui vengono rappresentati i domain nelle mappe, ad esempio in una mappa con “domain class” le varie classi di oggetti possono essere distinte con colori diversi. In una mappa raster può variare solo il colore mentre nelle mappe vettoriali la rappresentazione può definire anche la forma degli oggetti ad esempio la larghezza delle linee o i simboli associati ai punti.

Il “georeference” contiene informazioni sull’estensione di una mappa raster per mezzo della definizione dei vertici, inoltre viene specificato il sistema di coordinate utilizzato e la dimensione del pixel. Mappe di una stessa area devono utilizzare lo stesso georeference per poter essere confrontate, per questo esso è un oggetto di servizio utilizzato da più mappe. Mappe vettoriali non hanno un georeference ma soltanto un sistema di coordinate.

Un “ sistema di coordinate” è un oggetto che contiene informazioni sul tipo di coordinate che si stanno utilizzando nelle mappe, possono esser coordinate definite dall’utente o coordinate riferite ad uno standard nazionale o internazionale, in tal caso possono essere contenute informazioni aggiuntive sul tipo di proiezione utilizzato. Mappe vettoriali hanno sempre un sistema di coordinate, mappe raster hanno invece un georeference che utilizza un sistema di coordinate (vedi figure A.2.2 e A.2.3).

Funzioni raster

- Calcolo di nuove mappe
- Calcolo della distanza da un punto
- Creazione di un DEM
- Calcolo di pendenza ed esposizione
- Calcolo di “ attribute maps”
- Operazione di “cross”
- Unione di più mappe
- Creazione di “submaps”
- Operazione “rotate”

I calcoli con mappe raster possono essere eseguite in Ilwis con l’operatore “map calculation” o mediante gli scripts. Il “map calculation” permette di fare analisi e trasformazioni di dati spaziali: è possibile manipolare una o più mappe utilizzando diversi operatori e funzioni anche definite dall’utente, è inoltre possibile creare “attribute maps”.

Calcolare una attribute map per una mappa raster significa associare ad ogni pixel un valore,

una classe o un ID contenuto in una specifica colonna di una tabella di attributi.

La creazione di un DEM comporta sia operazioni compiute su dati vettoriali che raster, il prodotto finale è un DEM in formato raster. Il dato di partenza è di tipo vettoriale, costituito dalle curve di livello, queste vengono rasterizzate e successivamente interpolate. Il DEM viene spesso utilizzato per ricavare mappe delle pendenze e dell’esposizione, queste sono calcolate mediante l’applicazione di filtri e successivamente di funzioni mediante il map calculation. L’operazione di “cross” permette di sovrapporre due mappe raster e di confrontare i pixel nella stessa posizione, viene quindi prodotta una nuova tabella e una nuova mappa in cui ad ogni pixel corrisponde la combinazione dell’attributo della prima mappa con quello della seconda.

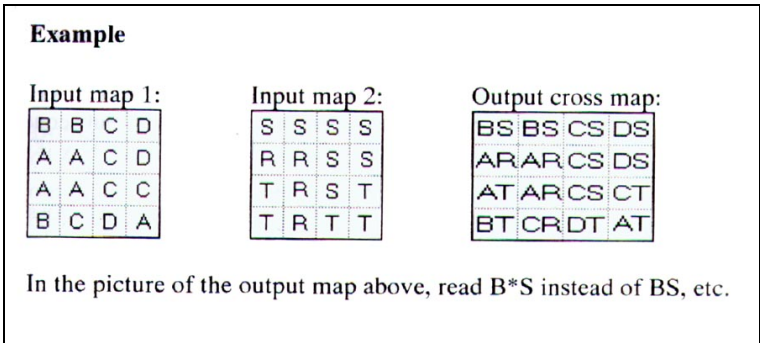


Fig A 1.4 operazione di “cross”

L’operatore “aggregate” permette di applicare una certa funzione di aggregazione (media, massimo, minimo, valore mediano, somma, ecc.) ad un certo gruppo di pixel per ricavarne un unico valore; ad ogni blocco di pixels a cui viene applicata la funzione corrisponderà in seguito un unico pixel pertanto le dimensioni del pixel variano e di conseguenza anche il georeference.

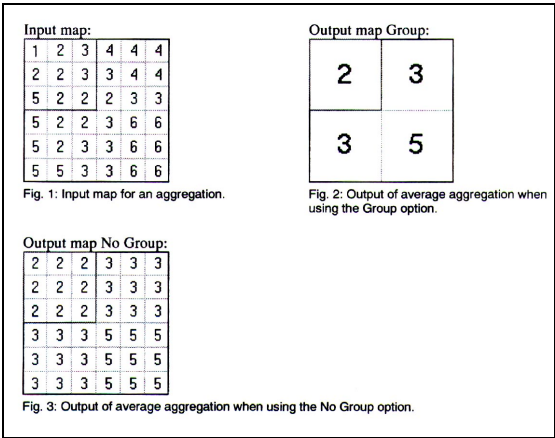


Fig A 1.5 funzione “aggregate”

Il calcolo della distanza è un'operazione che assegna ad ogni pixel la minima distanza da un altro pixel (il quale descrive una struttura puntiforme) o da un insieme di pixels (i quali descrivono una struttura lineare, ad esempio una strada).

Il calcolo di sottomappe consiste nel copiare una porzione rettangolare di una mappa raster in una nuova mappa, devono essere specificate le righe e le colonne della mappa di input che vanno copiate.

E' possibile unire due o più mappe raster in un'unica mappa, come nel caso di mappe vettoriali, la mappa ottenuta comprende le aree delle due mappe di input.

Funzioni vettoriali

Le più importanti funzioni vettoriali sono:

- Interpolazione
- Editing
- Assegnazione di labels a punti, linee e poligoni
- Creazione di mappe di attributi
- Unione di più mappe
- Tunneling

L'interpolazione è l'operazione che permette di passare da una mappa di punti o linee ad una mappa raster con valori distribuiti regolarmente. In Ilwis l'interpolazione viene eseguita a partire da punti o da curve di livello (in appendice sono contenute descrizioni più dettagliate degli algoritmi di calcolo).

L'editing è la funzione che permette di modificare le rappresentazioni degli oggetti in una mappa e di cambiarne il valore, la classe o l'ID.

L'assegnazione di labels permette di assegnare un codice a poligoni, linee e punti per mezzo di una mappa puntiforme di labels, ad ogni punto viene fatto corrispondere un oggetto della mappa. E' un'operazione utile nel caso in cui siano state digitalizzate delle entità spaziale alle quali però non è stato associato alcun codice o nome.

La creazione di una mappa di attributi è possibile per mezzo di una tabella di attributi collegata alla mappa per mezzo di un domain comune; a seconda dell'esigenza viene scelta di volta in volta la colonna di attributi da associare agli oggetti della mappa.

L'operazione di "mapglue" permette di unire due o più mappe che erano state digitalizzate separatamente.

Il tunneling è l'operazione che permette di smussare le linee eliminando vertici ridondanti:

viene costruito un corridoio di una certa dimensione attorno alla linea e ogni tre vertici viene eliminato quello centrale se ricade all'interno del tunnel, in questo caso infatti l'informazione sarebbe ridondante. Quanto più stretto è il tunnel tanto più l'andamento originario della linea viene mantenuto perché vengono eliminati meno vertici.

In Ilwis sono possibili conversioni tra mappe in formato vettoriale e raster.

La rasterizzazione è l'operazione di conversione di dati vettoriali in formato raster, può essere effettuata su mappe di punti, linee e poligoni. La mappa raster di output utilizza lo stesso domain della mappa di partenza.

Per la conversione deve essere selezionato un georeference esistente oppure deve esserne creato uno nuovo.

La vettorializzazione è il procedimento contrario di trasformazione di una mappa raster in mappa vettoriale. Sono possibili le seguenti conversioni:

da raster a poligoni: i poligoni vengono estratti da aree dove i pixels hanno lo stesso valore, classe o ID; il domain della mappa raster viene mantenuto, si può richiedere che i confini dei poligoni siano arrotondati;

- da raster a segmenti: permette di estrarre i confini di unità mappate in una mappa raster, ad ogni segmento è assegnato un codice identificativo;

- da raster a punti: permette di estrarre un punto per ogni pixel della mappa raster, ad ogni punto viene associato lo stesso valore, classe o ID del punto, da pixels non definiti non vengono creati punti.

Sono anche possibili le seguenti operazioni di trasformazione tra mappe vettoriali:

- da poligoni a segmenti: vengono estratti i confini dei poligoni e con essi viene creata una mappa di segmenti; l'operazione è utile quando si vogliano aggiornare i limiti dei poligoni;

- da poligoni a punti: viene creato un punto per ogni poligono, ad esso è attribuita la classe, il valore o l'ID del poligono; questa operazione permette di creare labels riferite ai poligoni;

- da segmenti a poligoni: per questa operazione è necessario che tutti i segmenti siano chiusi; i poligoni possono essere nominati con due differenti metodi: utilizzando delle labels puntiformi oppure in modo automatico, in questo caso i poligoni sono nominati in sequenza come pol 1, pol 2 etc.

- da segmenti a punti: permette di estrarre punti da una mappa di linee, sono possibili le seguenti possibilità: a) un punto per ogni nodo, b) punti a distanza regolare, c) punti per ogni coppia di coordinate nella mappa di segmenti.

APPENDICE B

Digitalizzazione e creazione di un DEM a partire dalla CTR alla scala 1:10,000

B.1 Digitalizzazione di una carta di curve di livello.

B.1.1 Georeferenziazione della carta

Dalle ortofotocarte della regione Umbria, relative all'area di studio, sono state riportate manualmente su fogli opachi indeformabili le curve di livello; tali fogli sono stati scannerizzati, ottenendo dei files raster in formato TIFF , i quali sono stati importati in Arc/Info.

Il primo passo da compiere per georeferenziare la carta è utilizzare il comando "register"; esso crea un file header *.tfw (in neretto sono evidenziati i comandi da digitare).

Arc: register nomemappa.tif

La carta viene visualizzata. Con i tasti del mouse si esegue uno zoom sui vertici della carta precedentemente indicati con un simbolo per individuare i quattro punti di riferimento.

Tasto centrale : stringe la finestra di zoom

Tasto sinistro : sposta la finestra

Tasto destro : visualizza la finestra

Si clicca su un vertice e si assegnano le coordinate in un sistema riconosciuto. Si ripete l'operazione per tutti e quattro i punti di riferimento e infine clicco:

Register e Save transformation.

Si controlla che l'errore tra le coordinate vere e quelle calcolate sia accettabile (ad esempio per una mappa 1:10,000, un errore inferiore al metro è accettabile).

B.1.2 Vettorializzazione della carta

Una volta creato il file *.tfw, che contiene le coordinate, si trasforma il file TIFF nel formato grid dell'Arcinfo con i seguenti comandi:

arc: imagegrid nomemappa.tif <nomegrid>

arc: grid (lancia il modulo raster)

grid: mape <nomegrid> (editor)

grid: gridshades <nomegrid> (display per vedere la mappa con valori 0-255)

grid: describe (controllo che x e y siano nelle coord. scelte)

grid: q (quit)

passo al modo vettoriale:

arc: gridline <nomegrid> tnomemappa (“t” indica che è una cover)

n.b.: è buona norma creare una copia della cover.

B.1.3 Preparazione della cover per la quotatura.

Bisogna ripulire la cover degli archi superflui (eventuali scritte, punti o segni fuori mappa...).

Si utilizza il modulo Arcedit.

Di seguito vengono elencati alcuni comandi di Arcedit:

Sel : seleziona un oggetto

Sel many: seleziona più oggetti

Sel all: seleziona tutti gli oggetti

Delete: elimina gli oggetti selezionati

Oops: annulla l'ultimo comando

Unsel: diseleziona un oggetto

Unsel many: diseleziona più oggetti

Unsel all: diseleziona tutti gli oggetti

Split: spezza un arco

Save: salva le modifiche in Arcedit

Tasto Pan\Zoom: contiene i comandi per muoversi all'interno dell'immagine

Una volta ripulita la carta, definisco alcuni parametri ed elimino i nodi ridondanti:

Arcedit: generalize 1.5 (crea un corridoio intorno agli archi selezionati)

Arcedit: list nomemappa.aat (visualizza la tabella associata alla mappa)

Arcedit: additem elevation 4 12 F 2 (aggiunge il campo "elevation" alla tabella associata alla mappa; in esso si inseriranno le quote)

4 = input; 12 = output; F= floating point;

2 = decimali

Arcedit: de node pseudo (visualizza gli pseudo nodi)

Arcedit: sel all

Arcedit: unsplit (elimina gli pseudonodi)

Arcedit: Save (salva il file)

B.1.4 Quotatura delle curve di livello.

Per quotare le isoipse della mappa, è stata scritta per lo scopo una macro di Arc/Info "quota.aml" che mi serve per quotare gli archi. Tale programma permette di inserire l'equidistanza tra le curve, la quota minore da cui si inizia la quotatura e di indicare sul display la curva iniziale da quotare.

Arcedit: &r quota

Equidistanza curve:	(dà 10 m di default)
Quota di partenza:	(la più da cui si parte)
Enterpoint	(indicare l'isoipsa di partenza sulla mappa e cliccare "sì" finchè non si arriva alla quota massima del gruppo di isoipse da quotare)

B.1.5 Correzione dei limiti delle carte.

Quando sono disponibili le mappe vettoriali quotate, si può procedere all'unione di più mappe, facendo coincidere i nodi ai limiti delle mappe.

Il comando in Arc/Info che permette l'operazione è "edgematch".

Arc: arccedit

Arcedit: edgematch

Viene visualizzata la finestra "coverage menu"; nella casella "edit coverage" si inserisce la mappa da modificare (cliccando il tasto centrale del mouse appare l'elenco delle mappe).

Nella casella "snap coverage" si inserisce invece la mappa tenuta come riferimento.

Si visualizzano le due mappe e compare la finestra "edgematchmenu". Sono disponibili i seguenti tasti:

"box"	seleziona l'area da modificare sul display
"add automatically"	(sposta automaticamente i nodi)
"box"	(nella "limitadjustement area")
"adjust"	
"save"	

Se i nodi tra le due mappe sono troppo distanti, è necessario correggere la loro posizione manualmente, come segue:

“add interactively (è l’opzione manuale)
“box” (nella “limit adjustment area”)
“adjust”
“save”

Ripeto il tutto per ogni lato di giunzione tra le varie mappe, fino a che tutti i nodi non coincidono.

B.1.6 Esportazione files da Arc/Info a Ilwis.

La procedura successiva è stata eseguita in Ilwis.

Il passaggio di files da Arc/Info a Ilwis necessita della trasformazione dei file di Arc/Info in files .e00 o in "shapefiles" (formato dell'Arc/View).

Arc: export cover <nomecover> <nome.e00>
Arc: arcshape nomecover arcs nomeoutput

Il nome di output può essere uguale al nome della cover.

“Arcs” indica che è un file di archi.

Il formato "shapefile" consiste di tre files:

*.dbf
*.shp
*.shx

in Ilwis è possibile importare i files di scambio con altri programmi utilizzando l'opzione "import".

B.1.7 Check dei segmenti.

Prima di poter unire le mappe, bisogna controllare ancora una volta che i segmenti non si intersechino o si sovrappongano e che i nodi non uniscano segmenti con quote (il valore del campo "elevation") diverse.

Ilwis è molto utile per compiere questa procedura attraverso pochi semplici comandi.

Vector operations - attribute map

Si visualizza la finestra in cui inserisco il nome della mappa e il campo "elevation", in modo da creare una mappa i cui attributi sono rappresentati dalle quote.

Clicco il tasto destro del mouse sul file della mappa; in “Properties” clicco “Break dependence link”, in modo che stacco il legame tra la mappa e la tabella degli attributi e posso lavorare solo sulla quota.

Visualizzo la mappa e così trasformata scelgo:

Edit - Edit layer - segment editor

Dal menu “file” dell'editor scelgo “remove redundant node” per eliminare gli eventuali pseudonodi .

Da “file”, inizio l’operazione di controllo scegliendo “check segments”. Si hanno varie possibilità: “self overlap”

“intersections”

“code consistency”

“dead end”

Le prime tre sono quelle che interessano. La prima controlla le sovrapposizioni, la seconda le intersezioni, la terza che gli archi adiacenti abbiano gli stessi codici. Vanno eseguite una alla volta finché non viene segnalato alcun errore.

B.1.8 Unione delle mappe.

Dopo aver sistemato le mappe di segmenti in modo che combacino tra loro, si può passare alla loro unione, utilizzando in Ilwis il comando "glueseg".

Con tale comando si possono unire contemporaneamente fino a 4 mappe; nel caso esse siano in numero superiore si provvederà all’unione successiva di gruppi di mappe precedentemente unite.

Una volta eseguito il comando appariranno le mappe unite in un unico file; a questo punto vanno rimossi ancora gli pseudonodi, attraverso l’editor. La mappa totale della topografia è così pronta per essere rasterizzata.

B.2 Creazione del DEM in Arc/Info.

Entrambi i softwares utilizzati nello studio, dispongono di interpolatori utili a creare un DEM a partire da una mappa di curve di livello. Sulla base dell'esperienza di uno studio precedente (Carro, 2000), in cui sono evidenziate le differenze tra gli interpolatori dei softwares Ilwis ed Arc/Info, si è scelto di creare il modello digitale del terreno in Arc/Info.

In Arc/Info devo ricreare la coverage della mappa topografica, importando il file di scambio .e00:

Arc: import cov nomefile nomeoutput

A questo punto posso lanciare l'interpolazione con il comando:

Arc: topogridtool nomedem <pixel size>

Topogridtool apre la finestra del comando "topogrid". Esso è un metodo di interpolazione specificatamente pensato per la realizzazione di modelli digitali del terreno idrologicamente corretti; si basa sul programma "Anundem" di Hutchinson (1988,1989), il quale si avvale di una tecnica di interpolazione alle differenze finite. Il programma utilizza agisce attraverso un'interpolazione "multirisoluzione": parte dal calcolo di un DEM raster con griglia a maglia grossolana per arrivare alla risoluzione finale indicata.

Finita l'operazione è necessario controllare il DEM in quanto è possibile che ci siano ancora degli errori nella quotatura delle mappe.

Per visualizzare il DEM si utilizza il modulo "grid" o "arcplot":

Arc: grid

Grid: lg (lista dei raster)

Grid: mape nomedem

Grid: gridpaint nomedem # linear # gray

Grid: mape* (per selezionare un'area da ingrandire)

Grid: clear (cancella il display)

Grid: ^g (ripete l'ultimo comando che inizia per "g")

Se vengono visualizzati degli errori, la mappa delle curve di livello deve essere corretta nuovamente e si deve procedere di nuovo all'interpolazione.

B.3 Digitalizzazione della carta geologica.

B.3.1 Utilizzo della tavoletta digitalizzatrice.

La digitalizzazione delle quattro carte geologiche alla scala 1:10,000 è stata compiuta attraverso l'utilizzo di una tavoletta digitalizzatrice. Essa è fornita di un mouse con annessa una tastiera, il quale permette di determinare la precisa posizione del cursore, tramite una fitta rete di fili elettrici all'interno della tavoletta: i fili verticali registrano la coordinata x,

mentre gli orizzontali la y; la posizione ha una precisione dell'ordine di una frazione di millimetro.

All'inizio, dopo aver attivato azionato la tavoletta, si imposta la configurazione contenuta nel manuale di Ilwis.

In Ilwis si deve accedere al setup del digitizer:

Options – digitizer - setup digitizer

Selezionare la porta di input

Verificare il corretto funzionamento dei tasti

Si inserisce il riferimento delle coordinate:

Options – digitizer – mapreference

Vengono inserite le coordinate coordinate

Appare una finestra in cui devono essere indicati i PUNTI di CONTROLLO sulla carta; sono necessari almeno tre punti di controllo con le rispettive coordinate nel sistema di riferimento utilizzato; ciò crea una corrispondenza tra le coordinate della tavoletta e quelle della carta da digitalizzare. E' auspicabile che l'errore sia minore di 1.

A questo punto si può creare la mappa di segmenti:

File – create – segmentmap

Si inserisce il nome della mappa e il sistema di coordinate (uguale a quello indicato per la tavoletta); si crea un nuovo domain, di tipo “class” contenente tre items (le quali indicheranno le tre classi di segmenti):

1	Limite stratigrafico
2	Faglia/limite stratigrafico
3	faglia

A questo punto tutto è pronto per la digitalizzazione. In aggiunta si opera all'interno dell'editor della mappa, inserendo due parametri:

File – customize

Snap tolerance (m) = 5 (tolleranza affinché due nodi si possano agganciare)

Tunnel tolerance = 0 (così si digitalizza ogni punto inviato attraverso il mouse digitalizzatore)

Il tasto “0” del mouse serve ad inserire i vertici, il tasto “2” indica il nodo terminale del segmento.

B.3.2 Poligonizzazione della mappa geologica.

Avendo eseguito la digitalizzazione della mappa di segmenti, bisogna da essa realizzare la mappa di poligoni corrispondenti alle varie litologie.

Prima però deve essere controllata la consistenza dei segmenti.

Le eventuali intersezioni vengono segnalate con l'operazione "check"- "intersection" del menù "file" dell'editor.

Inoltre per creare i poligoni, i segmenti non devono avere terminazioni isolate. Le terminazioni dei segmenti si possono evidenziare e correggere con "check – dead ends", nell'editor. A questo punto la mappa è pronta per la poligonizzazione:

Editing – polygonize

Si inserisce il domain contenente le classi litologiche.

Il programma crea i poligoni a cui ora devono essere assegnate le varie classi litologiche. E' molto utile creare una mappa di labels (centroidi dei poligoni), in modo che se la mappa dev'essere ripoligonizzata a causa di eventuali errori, l'assegnazione degli attributi ai poligoni può riniziare dal punto in cui si era arrivati.

Gli attributi possono essere assegnati selezionando un poligono e indicando la classe voluta, la quale sarà assegnata automaticamente e verrà visualizzata con il suo colore corrispondente.

B.3.3 Unione delle mappe geologiche.

Non essendo disponibili alcune carte geologiche alla scala 1:10,000, si è provveduto alla georeferenziazione e digitalizzazione di una mappa ricavata dai fogli alla scala 1:100,000; l'operazione è stata compiuta in Arc/Info, con una procedura analoga a quella utilizzata per le curve di livello.

Il tutto ha reso necessario risistemare i limiti delle mappe per far coincidere il diverso dettaglio.

Un ulteriore problema è nato dal fatto che la mappa alla scala 1:100,000 presentava delle coordinate geografiche riferite al meridiano di M.te Mario. Quindi si è dovuta traslare la carta riferendola al meridiano di Greenwich, in modo da trasformare tali coordinate in UTM (sistema adottato nelle carte al 10000). Si è operato in Ilwis:

Create – coordinate system – opzione formula

All'interno dell'opzione "formula" bisogna inserire l'entità della traslazione, riferito alle x o alle y.

Il diverso dettaglio delle carte ha inciso anche sull'assegnazione dei nomi delle formazioni geologiche ai poligoni: infatti il numero delle formazioni descritte alla scala 1:10,000 è maggiore di quello alla scala 1:100,000. Quindi si sono dovute accorpate alcune formazioni della carta di maggior dettaglio in modo che le voci corrispondessero in entrambe le mappe. Questo ha implicato la modifica della tabella degli attributi dei poligoni. In Arc/Info si è aggiunto un campo alla tabella, con il comando "additem". Di seguito si esplicita l'esempio di accorpamento della voce 'Sv' (scaglia variegata) nella voce 'Sc' (scaglia cinerea):

Arc: tables

Enter command: sel geotot.pat (seleziona la tabella dei poligoni *.pat)

Enter command: resel domain = 'Sv' (seleziona tutti i records 'Sv'
contenuti nel campo 'domain')

Enter command: move 'Sc' to geotot (aggiunge nel campo geotot, creato
con additem, la voce 'Sv' in tutti i
records)

Enter command: asel (annulla la selezione della tabella)

L'esempio è stato ripetuto anche per le voci 'MS' e 'CP', sostituite con 'RA'.

La sostituzione delle voci suddette ha portato ad avere nella mappa dei poligoni adiacenti aventi lo stesso attributo. Si è passati alla loro unione in un unico poligono con il comando:

Arc: dissolve inputmap outputmap <nomeitem>

Con il comando BUILD, si crea la mappa dei poligoni (perché Arc/Info prima crea una mappa di segmenti, rappresentanti il perimetro dei poligoni, accompagnata da una mappa di labels, i centroidi dei poligoni: entrambe servono per costruire la mappa poligonale).

Il passo successivo è quello di unire le mappe di diverso dettaglio.

La mappa così modificata è stata importata in Ilwis.

I segmenti sono stati modificati per farli coincidere, potendo così unire le due mappe di labels e le due di segmenti, con il comando "gluemap". E' stato ripetuto il "check" dei segmenti. Si è quindi proceduto alla poligonizzazione.

Vector operations – segment – segments to polygons

Nella finestra che appare viene scelta la mappa di segmenti e quella di labels inerente.

B.4 Digitalizzazione delle frane.

B.4.1 Poligonizzazione delle frane.

Le frane riportate sulle ortofotocarte sono state digitalizzate con la tavoletta digitalizzatrice in modo analogo alla mappa geologica.

È stato creato un domain di tipo “class” con 4 items:

1	zona di distacco
2	zona di distacco confinante con l’accumulo
3	zona di probabile distacco
4	accumulo

Dopo aver eseguito il “tunnelling” sulle otto mappe generate e dopo averle unite con “gluemap”, sono state create due sottomappe: la prima contenente solo le zone di distacco (classi 1,2,3); la seconda contenente gli accumuli (classi 2,4).

La carta degli accumuli è stata poligonizzata, creando un domain associato di tipo “identifier”, cioè con delle classi uniche (in tal caso il numero progressivo di ogni frana); ciò implica che una classe può essere assegnata esclusivamente ad un solo poligono.

Importante ai fini di un eventuale data base delle frane è l’associazione dei distacchi ai relativi accumuli. Questo viene fatto inserendo nella tabella attributi della mappa dei distacchi un campo “accumulo” in cui inserire il numero progressivo precedentemente assegnato ai poligoni rappresentanti gli accumuli.

In Arcinfo è possibile creare il campo suddetto nella tabella di archi (*.aat):

Arc: additem nomeinput.aat nomeoutput.aat nomecampo < a > < b > < c >

dove “a” e “b” sono la larghezza del campo (es. 5 e 5) e “c” sta per tipo (I = intero, F = float, ecc...).

Per assegnare i valori alle zone di distacco, utilizzo il modulo "arcedit".

Vengono visualizzate le zone di distacco, gli accumuli e il loro rispettivo codice.

A questo punto posso assegnare alle zone di distacco i valori nel campo "accumulo", tramite il comando "calc".

APPENDICE C

Elaborazione dati

C.1 Mappe dei parametri sismici.

Le mappe dei parametri sismici (PGA,PGV,AI) derivano dalle leggi di attenuazione.

Perciò bisogna essere in possesso delle mappe della distanza dalla sorgente sismica e di quelle riguardanti la geologia.

L'epicentro è rappresentato attraverso una mappa di punti. Per ottenere le distanze dall'epicentro, la mappa dev'essere prima rasterizzata:

Operations - Rasterize - Point to Raster

Si inserisce il nome della point map da rasterizzare, il nome della mappa di output e infine il georeference.

Si utilizza l'operazione "distance" per ricavare la mappa delle distanze:

Operations - Raster operations - Distance

Vanno indicate la mappa sorgente, il nome della mappa di output, il domain "distance", il range dei valori e la loro precisione come cifre decimali.

Si procede analogamente per la mappa della distanza dalla proiezione della faglia con la sola differenza che l'oggetto di partenza è una mappa di segmenti; viene poligonizzato il rettangolo della proiezione selezionando la mappa di segmenti con il tasto destro del mouse e scegliendo:

Vectorize - Segment to Polygon

Il poligono viene rasterizzato da:

Operation - Rasterize - Polygon to Raster

Infine si riapplica l'operazione "distance".

Le mappe geologiche da inserire nelle leggi di attenuazione riguardano solo alcune classi generali (substrato, depositi, ecc...); la mappa geologica deve essere generalizzata; questo è permesso dall'operazione "mask":

Operations - Vector operations - Polygons - Mask polygons

Le mappe ottenute con "mask" vanno trasformate in mappe binarie, cioè contenenti solo valori 1 e 0, indicanti rispettivamente la presenza o no dell'attributo considerato, come richiesto dalle leggi di attenuazione.

Dopo aver rasterizzato le mappe risultanti, si devono eliminare i pixels aventi valore indefinito ("?"), tramite la funzione "mapcalc"

Nella finestra che appare bisogna digitare l'espressione di calcolo, in cui, oltre alle formule matematiche, è possibile inserire il nome delle mappe sulle quali eseguire l'operazione; come espressione si inserisce l'operatore logico "IFUNDEF":

IFUNDEF (nomemappa, 0, 1)

L'espressione assegna ad un pixel il valore 0 se nella mappa indicata è presente un valore indefinito, altrimenti assegna il valore 1. Dopo l'espressione nella finestra del "Map calculate" bisogna indicare il nome della mappa di output e il domain da assegnare alla mappa; se, come in questo caso si assegna il domain "value", allora in aggiunta si deve inserire il range dei valori e la loro precisione.

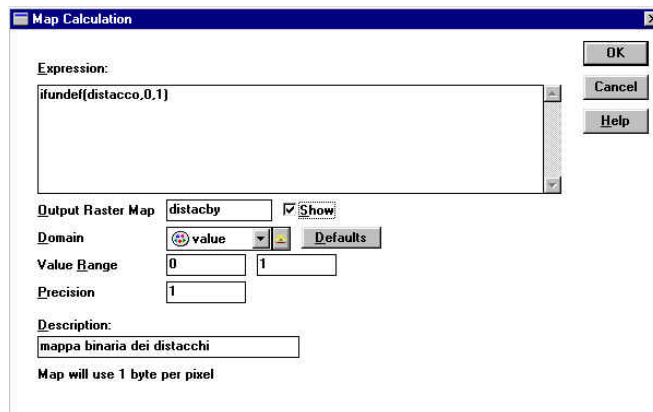


Fig.C1 Finestra di "Mapcalc", in Ilwis.

Il "Map calculate" infine è ancora utilizzato per calcolare le mappe dei parametri sismici. Nella finestra dell'espressione si digita la formula della legge di attenuazione, inserendo i nomi delle mappe della distanza e di quelle binarie derivate dalla geologia.

C.2 Sovrapposizione e incrocio di due mappe.

Per poter confrontare due mappe in Ilwis, esse devono rispondere a due requisiti:

- essere mappe raster;
- essere sovrapponibili.

Partendo dal presupposto che le due mappe siano già in formato raster, per soddisfare la seconda condizione è necessario che esse utilizzino lo stesso "georeference". Infatti, possedendo la stessa dimensione di un pixel (la "pixelsize") ed essendo georiferite rispetto al medesimo sistema di coordinate, le due mappe possono essere sovrapposte da Ilwis, in modo che ogni cella di una mappa corrisponda esattamente alla cella dell'altra mappa. Come già descritto in appendice A, questo è svolto dall'operazione "Cross" (vedi figura

A.2.4).

La sovrapposizione di mappe con l'operazione "Cross" è stato impiegato durante l'analisi della correlazione tra le frane di crollo e i parametri considerati.

Il risultato dell'operazione è la creazione di una tabella ("cross table") in cui la prima colonna, avente il ruolo di domain, contiene tutti le possibili combinazioni tra i valori o le classi delle due mappe; accanto a questa, ci sono altre quattro colonne: nelle prime due vengono ripetuti individualmente i valori degli attributi di ognuna delle mappe; nelle ultime due si trova rispettivamente il numero di pixels per ogni coppia di valori e l'area che occupano.

Per ricercare le correlazioni nella statistica multivariata, sono state sovrapposte prima due mappe parametriche (ad esempio pendenza e PGA) e la mappa risultante è stata successivamente sovrapposta con la mappa delle frane; non è infatti possibile incrociare più di due mappe per volta.

Una volta ottenuta la "cross table", è possibile compiere delle operazioni sulle colonne stesse della tabella.

Con il comando "sort" si ordinano i dati secondo il campo scelto, in ordine crescente o decrescente.

Con "join" è possibile aggiungere una colonna di un'altra tabella, se esolo se esse possiedono un campo comune.

Nella barra dei comandi all'interno della "cross table" si possono digitare delle operazioni in modo da creare nuove colonne: un semplice esempio è una colonna somma di due colonne; nella barra sarà sufficiente scrivere il nome della colonna da creare seguita da un "=" e dall'espressione di calcolo. Le espressioni possono contenere gli stessi elementi che si utilizzano nel "Map calculate"; la differenza è che, invece di inserire nomi di mappe, si inseriscono nomi di colonne.

C.3 Calcolo della densità relativa delle frane rispetto ad un parametro.

Utilizzando la barra degli strumenti della "cross table" si è giunti al **calcolo della densità relativa** delle frane in ogni classe che rappresenta una combinazione unica.

Prendiamo come esempio il livello informativo "pendenza": dopo aver sovrapposto la mappa delle pendenze con quella delle frane in formato binario, è stata ottenuta la colonna (di nome npix) contenente il numero di pixels per ogni coppia "pendenza- presenza di frana" e per ogni coppia "pendenza-assenza di frana".

- 1) Calcolo dell'area totale (espresso come numero di pixels totali)

areatot = aggsun (npix)

l'operatore "aggsun" restituisce la somma dei valori contenuti nella colonna specificata tra parentesi;

la colonna "areatot" avrà in tutte le celle lo stesso valore, che è l'area totale di studio.

- 2) Calcolo dell'area di ogni classe in un livello informativo.

areacla = aggsun (npix, slope)

specificando tra parentesi una seconda colonna, "aggsun" calcola la somma dei valori nella prima colonna indicata, corrispondenti ad ognuna delle classi della seconda colonna; infatti in "areacla" si avranno valori uguali nelle celle corrispondenti a valori uguali della colonna "slope".

- 3) Calcolo del numero totale di pixels con frana

tmp = iff (frana=1, npix, 0)

areafrana = aggsun (tmp)

nella colonna "tmp" viene scritto il valore trovato in "npix" se la colonna "frana" presenta il valore 1, altrimenti viene scritto 0;

la colonna "areafrana" presenta lo stesso valore in tutte le celle e rappresenta l'area totale in frana nell'area di studio.

- 4) Calcolo del numero di pixels con frana per ogni classe del livello informativo.

afracla = iff (frana = 0, areacla-npix, npix)

la colonna afracla presenta gli stessi valori nelle celle corrispondenti ad una stessa classe del parametro.

- 5) Calcolo della **densità relativa** delle frane in ogni classe del parametro

Dr = afracla/areacla

Rappresenta la percentuale di frane contenute in ogni combinazione unica.

C.4 Calcolo dei coefficienti della legge di suscettibilità alle frane di crollo.

L'analisi statistica è stata compiuta con il programma Excel; i files delle tabelle contenute in Ilwis sono state esportate come files *.dbf (data base file).

Le correlazioni trovate tra le frane e i singoli parametri sono state considerate contemporaneamente attraverso una regressione lineare che stabilisce una relazione tra le variabili considerate del tipo:

$$y = \sum m_i x_i + b$$

dove **y** è la variabile dipendente, le **x_i** sono le variabili indipendenti e **b** è il termine noto.

Excel possiede l'operatore "regr.lin", il quale permette di gestire una notevole mole di dati.

Tale operatore restituisce i risultati della regressione lineare in una matrice. Inizialmente bisogna selezionare nel foglio di calcolo un certo numero di celle sufficienti a contenere i risultati. Selezionato lo spazio per la matrice, bisogna indicare i dati da elaborare; questo avviene digitando la formula nella barra dei comandi:

regr.lin(y_nota;x_nota;cost;stat)

y_nota si riferisce ai valori relativi alla variabile indipendente;

x_nota si riferisce ai valori delle variabili indipendenti; se ad esempio le variabili indipendenti sono due, bisogna indicare la cella di partenza della prima variabile e l'ultima cella della seconda variabile; in tal modo si selezionano contemporaneamente le due colonne corrispondenti, le quali devono essere necessariamente adiacenti; la sintassi per indicare una colonna di dati consiste nelle coordinate della prima cella in alto e in quelle dell'ultima in basso, divise da ":";

cost è un valore logico che specifica se il termine noto **b** dev'essere uguale a 0, (cost = "falso"); mentre cost = "vero", il termine noto viene calcolato con la procedura standard;

stat è un valore logico che restituisce delle statistiche aggiuntive se posto uguale a "vero"; se stat è "falso", "regr.lin" calcola solamente i coefficienti **m_i** e il termine noto.

Le statistiche aggiuntive considerate nell'applicazione sono le deviazioni standard per i coefficienti (**s_i**), per il termine noto (**s_b**) e per la variabile dipendente (**s_y**), oltre al coefficiente di determinazione **r²**.

La matrice restituita da "regr.lin" ha la seguente struttura:

m_n	m_{n-1}	...	m₂	m₁	b
s_n	s_{n-1}	...	s₂	s₁	s_b
r²	s_y				
F	df				
sreg	sresid				

Gli ultimi quattro termini **F**, **df**, **sreg** e **sresid** sono le statistiche non utilizzate nell'applicazione: **F** è una statistica per determinare se la relazione è casuale, **df** indica i gradi di libertà per trovare i valori critici di **F**, **sreg** è la somma della regressione dei quadrati, **sresid** è la somma residua dei quadrati.

APPENDICE D

Visualizzazione delle mappe

D.1 Visualizzazione delle mappe in Arc/Info.

La visualizzazione delle mappe in Arc/Info è possibile attraverso l'utilizzo dei moduli "arccedit", "arcplot" e "grid".

D.1.1 Visualizzazione in Arccedit.

Arccedit è il modulo predisposto per poter agire su mappe vettoriali, mentre mappe raster e immagini sono visualizzate sul display solo come background.

La procedura da seguire per visualizzare una mappa vettoriale è la seguente:

Arc: ae	(lancia Arccedit)
Arccedit: mape nomemappa	(definisce l'estensione della mappa che si vuole visualizzare)
Arccedit: edit cover	(carica la mappa)
Arccedit: draw environment	(specifica la caratteristica da visualizzare)
Arccedit: edit feature	(specifica la caratteristica da modificare)
Arccedit: draw	(visualizza la mappa)

Al comando "draw environment" bisogna aggiungere la caratteristica che si vuole visualizzare; le possibilità sono: archi ("arcs"), punti ("points"), poligoni ("poly"), nodi ("node"), labels e tics (itics sono i punti di controllo delle coordinate).

Se si vuole visualizzare una mappa solo come sfondo sul display di Arccedit bisogna utilizzare i comandi:

Arccedit: back cover nomemappa	(carica la mappa)
Arccedit: back environment	(aggiungere il tipo di caratteristica che si vuole visualizzare)
Arccedit: backsymbolitem nomemappa <caratt> #	(# è un numero che indica il colore che si vuole abbinare alla caratteristica specificata)

Per visualizzare una mapparaster, solo come sfondo, si usa:

Arccedit: mape image nomemappa
Arccedit: image nomemappa

D.1.2 Visualizzazione in Arcplot.

Arcplot è il modulo per la preparazione di layout di stampa. In esso possono essere visualizzate sia mappe vettoriali che raster, nonché immagini.

Dopo aver definito l'estensione della mappa da visualizzare con il comando "mape nomemappa", so può definire il tipo di mappa in base alle seguenti opzioni:

- "arcs" se è una mappa di segmenti;
- "points" se è una mappa di punti;
- "polys" se è una mappa di poligoni;
- "image" se è un'immagine;
- "gridshades" o "gridpaint" se è una mappa raster;
- "arcline" se si vogliono visualizzare archi in funzione dei loro attributi;
- "polygonshades" se si vogliono visualizzare poligoni in funzione dei loro attributi;

Per "arcline" e "polygonshades" bisogna specificare il campo degli attributi e la "color lut" (ossia la tabella dei colori) da abbinare agli elementi visualizzati.

D.1.3 Visualizzazione in Grid.

Per la visualizzazione nel modulo Grid è possibile scegliere tra il comando "gridshades" o "gridpaint" seguiti dal nome della mappa, dal nome del campo voluto degli attributi, dallo stretch con cui si vuol visualizzare la mappa e dalla "color lut".

Inoltre si possono sovrapporre alla mappa raster delle mappe vettoriali, utilizzando i medesimi comandi di "arcplot".

D.2 Visualizzazione delle mappe in Ilwis.

In Ilwis, selezionando l'icona della mappa che si vuol visualizzare, appare una finestra in cui bisogna selezionare le voci che interessano:

- "info": permette di visualizzare l'attributo associato alla mappa;
- "mask": permette di visualizzare solo gli elementi specificati;
- "boundary only": in una mappa poligonale visualizza solamente i contorni dei poligoni;
- "boundary color" e "boundary width": rispettivamente selezionano il colore e lo spessore

dei contorni;

- "attribute": permette di selezionare uno specifico attributo dalla "attribute table";
- "representation": abbina alla mappa la rappresentazione di colori scelta;
- "single color": visualizza la mappa in un solo colore scelto;
- "light", "normal", "dark": si riferiscono alla luminosità della visualizzazione di mappe raster;
- "gray": visualizza l'immagine in toni di grigio.

APPENDICE E

Analisi dei danni agli edifici

E1 Calcolo del danno agli edifici.

Per poter calcolare il danno agli edifici come spiegato nel Capitolo VIII, è stato necessario associare alla mappe poligonali delle sezioni di censimento ISTAT (1991) la tabella degli attributi dei dati, contenente i valori relativi al numero di abitazioni, al numero di edifici e alla superficie totale delle abitazioni in una sezione. Le mappe poligonali si riferiscono ai Comuni di Perugia e di Macerata.

Il lavoro è stato eseguito in ambiente Arc/Info, in cui inizialmente sono state legate la tabella di poligoni ".pat" con la tabella di dati ".dat", attraverso il comando "relate", indicando come campo comune il codice amministrativo delle sezioni "cod-amm-sez".

Alla tabella di poligoni sono stati aggiunti tre campi, "n-edif", "suptot-c", "n-abit", nei quali sono stati inseriti i dati relativi ai tre livelli informativi richiesti. La procedura è la seguente:

Arc: additems perugia.pat perugia.pat n-edif 10 10 n (aggiunge campo n-edif
alla tabella perugia.pat, con dimensioni del campo 10,
10 e valori interi "n")

Arc: additems perugia.pat perugia.pat suptot-c 10 10 n

Arc: additems perugia.pat perugia.pat n-abit 10 10 n

Arc: tables (apre il modulo tables)

Enter command: sel perugia.pat (seleziona la tabella perugia.pat)

Enter command: calc n-edif = istat_pg//n-edif (copia nel campo n-edif i dati
contenuti nella relazione temporanea
istat_pg)

Enter command: calc suptot-c = istat_pg//suptot-c

Enter command: calc n-abit = istat_pg//n-abit

Dopo aver svolto l'operazione analogamente anche per i Comuni di Macerata, sono state unite le mappe poligonali delle due Province:

Arc: append mc_pg poly all

Enter the 1st coverage: perugia

Enter the 2st coverage: macerata

Arc: build mc_pg poly (costruisce la nuova mappa di poligoni a
da archi e labels)

A questo punto sono state sovrapposte la nuova mappa delle sezioni di censimento,

contenente i campi aggiunti, con la mappa dei danni osservati.

Arc: intersect danni mc_pg danni_sez # point (interseca le mappe "danni" e "mc_pg", creando la mappa di punti "danni_sez")

L'operazione sopra descritta permette di creare una tabella di attributi in cui, per ogni danno osservato, si conosce la classe e il codice amministrativo della sezione nella quale ricade.

In questa tabella si inseriscono, con il comando "additem", i nuovi campi che conterranno i valori del peso normalizzato del danno ("peso_n"), del peso del danno ("peso"), del volume medio di un edificio ("volume_m") e del volume pesato sul danno ("vol-peso").

Si calcolano i valori dei vari campi:

Arc: tables

Enter command: sel danni_sez.pat

Enter command: resel code = 1 (seleziona solo le tabelle con il campo "code" uguale a 1, indicante la classe di danno)

Enter command: calc peso_n = 40 / n-edif (calcola il peso normalizzato come peso della classe uno diviso il numero di edifici nella sezione; analogamente si calcolano i pesi normalizzati per le classi di danno 2, 3 e 4)

Enter command: sel danni_sez.pat

Enter command: calc peso = peso_n * n-edif (inserisce i pesi relativi alle classi di danno nel campo "peso")

I pesi calcolati sopra si riferiscono ad ogni singolo danno osservato; per conoscere i pesi del danno relativi ad ogni sezione di censimento, bisogna calcolare la sommatoria di tutti i pesi di una sezione; a tale scopo si utilizza il comando "statistics":

Arc: statistics danni_sez.pat pesi.dat comm-amm-sez

Sum peso_n

Sum peso

End

Il comando così scritto, crea una tabella "pesi.dat" nella quale saranno inseriti i campi "sumpeso_n" e "sumpeso", contenenti rispettivamente le somme dei campi "peso_n" e "peso" di tutte le tabelle in "danni_sez.pat", per ogni codice amministrativo della sezione.

Infine si unisce la tabella "pesi.dat" (e quindi i suoi campi) alla tabella "mc_pg.pat" delle sezioni di censimento, con il comando "joinitem".

Analogamente si calcolano i volumi di danneggiamento in ogni sezione di censimento. Nella

tabella "danni_sez" sono stati calcolati i volumi medi di un edificio, inseriti nel campo "volume_m"; i volumi medi si ricavano moltiplicando per 3 m il valore della superficie totale di appartamenti in una sezione (campo "suptot-c") e dividendo quindi per il numero di edifici (campo "n-edif"). Per ogni classe di danno, si moltiplica il volume medio di un edificio per il peso del danno dello stesso, quindi si divide per 100; in questo modo si ottiene il volume di edificio danneggiato, pesato sul danno (campo "vol_peso"). Si sommano i valori di "vol_peso" per ogni sezione con il comando "statistics", creando la tabella "volumi.dat"; quest'ultima si attacca a "mc_pg.pat" con "joinitem".

E2 Determinazione della vulnerabilità.

Le "Schede di 1° livello del GNDT per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici", raccolte a partire dal 1983, sono state il punto di partenza per assegnare i valori di vulnerabilità ad ogni sezione di censimento.

Disponendo dei dati relativi alle Province di Ancona, Macerata, Ascoli Piceno e L'Aquila, è stato possibile inserire nel Data Base Management System "Access '97" di Windows le schede contenenti essenzialmente i seguenti campi:

- codice Regione;
- codice Provincia;
- codice Comune;
- numero della scheda;
- numero di piani fuori terra;
- età di costruzione dell'edificio;
- efficienza degli impianti (7 campi);
- tipologia edilizia prevalente;
- vulnerabilità.

Attraverso "Access '97", sono state eseguite successive estrazioni di dati, in modo da ottenere i valori di vulnerabilità per ogni classe di edificio; le classi contengono le seguenti informazioni:

- edilizia prevalente;
- numero di piani fuori terra;
- efficiente / non efficiente;
- età di costruzione dell'edificio.

Le tabelle finali riuniscono quindi tutti i valori delle schede che possiedono le stesse

informazioni viste sopra e tutti i valori di vulnerabilità associati a quel tipo di edificio.

Esse sono state utilizzate per calcolare la vulnerabilità media di ogni classe di edificio.

In "Matlab" è stato possibile scrivere un programma che visualizzasse la distribuzione dei valori di vulnerabilità, le funzioni di densità di probabilità Gamma e Weibull con le relative medie della vulnerabilità e infine i residui tra le funzioni di probabilità basate sui dati reali e le curve teoriche.

Il listato del programma relativo alla funzione Weibull è il seguente:

```
close all
clear all

fname=input('nome file --->','s')
finp = fopen(fname,'r')

% legge le colonne del file
a = fscanf(finp,'%f ',[2,inf]);
% trasposta della matrice
per = a';

%isola la colonna della vulnerabilità
id = per(:,2);

%trova i parametri della weibull a,b e i valori del 95% di confidenza
[phat,pci]=weibfit(id)

a = phat(:,1)
b = phat(:,2)
[mwei,vwei] = weibstat(a,b)
% ordina i valori della vulnerabilità
ids = sort (id);

% calcola la cdf con i dati originali
% come numero di valori <= ids(i,1)/numero totale di osservazioni (ids)
[count]=size(ids);

for i = 1:1:count(1,1)
ii = 0;
    for nn = 1:1:count(1,1)
        if ids(i,1) >= ids(nn,1)
            ii = ii+1;
        end
        prob(i,1)=ii./count(1,1);
    end
end

%calcola la pdf e la cdf dei dati originali secondo la distribuzione weibull

y=weibpdf(ids,a,b);
y1=weibcdf(ids,a,b);

%calcola media, varianza, dev std, skewness e kurtosis
m=mean(ids)
```

```

v=var(ids)
sd=std(ids)
sk=skewness(ids)
ku = kurtosis (ids)

%esegue i grafici
% istogramma dei valori originali
subplot(1,3,1)
hist(ids)
xlabel('Vulnerabilità')
ylabel('Numero di edifici')
legend (sprintf('m=%4.2f std=%4.2f sk=%4.2f ku=%4.2f', m, sd, sk, ku))
title ('ISTOGRAMMA')

% plotta la densità di probabilità
subplot(1,3,2)
plot(ids,y)
xlabel(sprintf('Vulnerabilità'))
ylabel('PDF')
legend (sprintf('a=%4.2f b=%4.2f m=%4.2f std=%4.2f', a, b, mwei,
sqrt(vwei)))
title('WEIBULL')

res=prob-yl;
sres=std(res) %deviazione standard dei residui

% plotta i dati
subplot(1,3,3)
%h = weibplot(ids)
loglog(ids,y1,'.-r')
grid on
hold on
loglog(ids,prob,'+b')
title ('Weibull probability plot')
hold on
xlabel(sprintf('Vulnerabilità'))
ylabel('CDF')
legend (sprintf('Dev.standard=%5.4f',sres));

%maxi = max(ids)
%maxa = fix(maxi+1)
%calcolo residui
%res=prob-yl;
%sres=std(res) %deviazione standard dei residui
%figure,plot(ids,res,'.b','MarkerSize',10),grid on;
%axis([0 maxa -1 1]); %set asse
%legend (sprintf('Dev.standard=%5.4f',sres));
%xlabel(sprintf('Vulnerabilità'))
%ylabel('Residui')

```

Analogo è il programma per la funzione Gamma.

I grafici risultanti dai programmi sono visualizzati in Appendice G.

Confrontando caso per caso le deviazioni standard dei residui derivanti dalla funzione Gamma e Weibull, sono state scelte le curve che meglio si adattano ai valori reali e di conseguenza i valori di vulnerabilità media per ogni classe di edificio.

Tali valori sono stati poi trasformati in una matrice compatibile con i dati ISTAT, per ogni sezione di censimento. Le vulnerabilità medie sono state quindi moltiplicate per i volumi delle rispettive classi di edifici, descritte nel Capitolo VIII. I prodotti sono stati sommati tra loro e il risultato è stato diviso per il volume totale di una sezione, in modo da ottenere la vulnerabilità media di una sezione di censimento.

E.3 Confronto dei fattori di amplificazione.

L'individuazione di possibili zone di amplificazione è stata eseguita con l'aiuto del SIT Ilwis, nel quale è stata importata la mappa poligonale delle sezioni di censimento relative ai sei Comuni analizzati, come scritto nel Capitolo VIII.

La mappa poligonale è stata rasterizzata in modo che si potessero creare due "attribut map" ricavate dalla tabella degli attributi associata ai poligoni: una relativa al danno percentuale nelle sezioni di censimento e l'altra relativa alla vulnerabilità.

Le due "attribut map" sono state classificate con la seguente procedura: in primo luogo si crea un "domain - class - group", in cui si inseriscono le classi e i range di valori in cui devono ricadere le classi (vedi descrizione in Capitolo VIII); quindi attraverso l'operazione "mapcalc" si utilizza la funzione "CLFY", indicando la mappa raster da classificare e il domain appena creato.

Una volta ottenute le mappe raster classificate, bisogna creare la matrice contenente i fattori indicanti le possibili zone di amplificazione: si utilizza il comando "File - Create - 2 dimensional table"; nella finestra di dialogo si inseriscono il nome della tabella, i domains associati alle mappe classificate, il domain "value" della tabella che si sta creando con l'opportuno range di valori (in questo caso da 1 a 4, vedi Capitolo VIII), la precisione dei valori (in questo caso 1.0); quando appare la struttura della tabella si inseriscono i valori.

Infine per creare la mappa, generata dalla matrice costruita, si digita, nella barra dei comandi:

```
<nomemappa> = <nome2Dtable> [<nomemappa_danno>, <nomemappa_vulnerabilità>]
```

La mappa prodotta è stata sovrapposta con la mappa dei comuni, utilizzando il comando "cross", in modo da generare una tabella contenente i codici progressivi delle sezioni uguali alla tabella dei comuni e i fattori della matrice associati ad ogni sezione. La colonna dei fattori è stata aggiunta (operazione "join") alla tabella dei comuni, accanto alla colonna dei fattori di amplificazione della microzonazione sismica.

APPENDICE F
Scala macrosismica
Mercalli - Cancani - Sieberg
(MCS, 1930)

I grado. Impercettibile: rilevato soltanto da sismografi.

II grado. Molto leggero: avvertito soltanto da rare persone nervose, oppure molto sensibili, che si trovano in perfetta quiete e quasi sempre ai piani superiori dei caseggiati.

III grado. Leggero: anche in zone densamente abitate viene percepito come scuotimento soltanto da una piccola parte degli abitanti nell'interno delle case, come nel caso del passaggio di una automobile a velocità elevata. Da alcuni viene riconosciuto quale terremoto soltanto dopo averne ragionato tra loro.

IV grado. Moderato: non molte delle persone che si trovano all'esterno degli abitati percepiscono il terremoto. All'interno delle case viene identificato da molte persone, ma non da tutte, in seguito al tremolio, oppure ad oscillazioni leggere di mobili, in seguito alle quali cristalleria e vasellame, posti a breve distanza, urtano come al passaggio di un pesante autocarro su pavimentazione irregolare, finestre tintinnano, porte, travi ed assi in legno scricchiolano, cricchiano i soffitti. In recipienti aperti i liquidi vengono leggermente mossi. In casa si ha la sensazione che si rovesci un oggetto pesante (sacco, mobili), oppure di oscillare con tutta la sedia o il letto, come su una barca con mare mosso. Questo movimento non provoca paura a meno che le persone non siano diventate nervose o apprensive a causa di terremoti precedenti. In rari casi i dormienti si svegliano.

V grado. Abbastanza forte: anche nel pieno delle attività giornaliere il sisma viene percepito da numerose persone sulle strade e, se sensibili, anche in campo aperto. Negli appartamenti si avverte in seguito allo scuotimento dell'intero edificio. Piante e rami deboli di cespugli ed alberi si muovono visibilmente, come se ci fosse un vento moderato. Oggetti pendenti come tendaggi, semafori, lampade e lampadari non troppo pesanti entrano in oscillazione; campanelli suonano; orologi a pendolo si fermano od oscillano con maggior periodo, secondo se la direzione della scossa è perpendicolare o normale al moto di oscillazione; a volte orologi a pendolo fermi riprendono il movimento; molle dell'orologio risuonano; la luce elettrica guizza o viene a mancare in seguito a movimenti della linea; quadri urtano, battono contro le pareti, oppure si spostano; da recipienti colmi e aperti vengono versate piccole quantità di liquido; ninnoli ed oggetti del genere possono cadere, come anche oggetti addossati alle pareti, arredi leggeri possono perfino essere spostati di poco; mobili rintronano; porte ed imposte si aprono e si chiudono sbattendo; vetri delle finestre si infrangono. Quasi tutti i dormienti si svegliano. Sporadicamente persone fuggono all'aperto.

VI grado. Forte: il terremoto viene notato da tutti con paura, cosicché molti fuggono all'aperto, alcuni credono di dover cadere. Liquidi si muovono fortemente; quadri, libri e cose simili cadono dalle pareti e dagli scaffali; porcellane si frantumano; suppellettili assai stabili, e perfino isolati pezzi d'arredo vengono spostati se non rovesciati; campane minori in cappelle e chiese, orologi di campanili battono. In singole case solidamente costruite nascono danni leggeri: spaccature all'intonaco, caduta del rinzafo di soffitti e di pareti. Danni più forti, ma non ancora pericolosi, si hanno su edifici mal costruiti. Qualche tegola e pietra di camino può cadere.

VII grado. Molto forte: lesioni notevoli vengono provocate ad oggetti di arredamento degli appartamenti, anche di grande peso con il rovesciamento e la frantumazione. Campane maggiori rintoccano. Corsi d'acqua, stagni e laghi si agitano e s'intorbidiscono a causa della melma mossa. Qua e là, parti delle sponde di sabbia e ghiaia scivolano via. Pozzi variano il livello dell'acqua. Danni moderati a numerosi edifici costruiti solidamente: piccole spaccature nei muri, caduta di parti piuttosto grandi dell'incalcinatura e dello stucco, di mattoni; caduta generale di tegole. Molti fumaioli vengono lesi da incrinature, da caduta di tegole, da fuoriuscita di pietre; camini già rovinati si rovesciano sopra il tetto e lo danneggiano. Da torri e costruzioni alte cadono decorazioni mal fissate. Con case a pareti intelaiate, i danni all'incalcinatura e all'intelaiatura sono abbastanza forti. Crollo singolo di case mal costruite oppure riattate.

VIII grado. Rovinoso: interi rami d'albero ondeggiando vivacemente e perfino si staccano. Anche i mobili più pesanti vengono spostati lontano dal proprio luogo d'origine e a volte rovesciati. Pietre miliari, statue nel terreno o anche nelle chiese, in cimiteri e parchi pubblici, ruotano sul proprio piedistallo oppure si rovesciano. Solidi muri di cinta in pietra sono aperti ed atterrati. Circa un quarto delle case riporta gravi distruzioni; alcune crollano; molte diventano inabitabili. Negli edifici ad intelaiatura cade gran parte della tamponatura. Case in legno vengono schiacciate o rovesciate. Spesso campanili di chiese e ciminiere di fabbriche con la loro caduta provocano ad edifici vicini lesioni più gravi di quanto non avrebbe fatto da solo il terremoto. In pendii e terreni acquitrinosi si formano crepe; in terreni bagnati si ha l'espulsione di sabbia e di melma.

IX grado. Distruttivo: circa la metà di case in pietra sono gravemente distrutte, molte crollano, la maggior parte diviene inabitabile. Case ad intelaiatura sono divelte dalle proprie fondamenta e schiacciate su se stesse, e con ciò travi di qualche ambiente sono strappate per cui, a seconda delle circostanze, contribuiscono assai alla rovina.

X grado. Completamente distruttivo: gravissima distruzione di circa 3/4 degli edifici; la maggior parte crolla. Perfino costruzioni solide di legno e ponti subiscono gravi lesioni, alcuni vengono distrutti. Argini e dighe ecc., chi più chi meno, sono danneggiati notevolmente, binari leggermente piegati e tubature (gas, acqua e scarichi) vengono troncate, rotte e schiacciate. Nelle strade lastricate e asfaltate si formano crepe e per pressione sporgono larghe pieghe ondose. In terreni meno densi e specialmente in quelli umidi si creano spaccature fino alla larghezza di più decimetri; in particolar modo si notano parallelamente ai corsi d'acqua crepature che raggiungono larghezze fino a un metro. Non solo scivola terreno piuttosto molle dai pendii, ma interi macigni rotolano a valle. Grossi massi si staccano dagli argini dei fiumi e da coste scoscese, in riviere basse si arriva a spostamenti di masse sabbiose e fangose, per cui il rilievo del terreno talvolta subisce cambiamenti non essenziali. Pozzi variano di frequente il livello dell'acqua. Da fiumi, canali, laghi, ecc., le acque vengono gettate contro le sponde.

XI grado. Catastrofico: crollo di tutti gli edifici in muratura, solide costruzioni e capanne di legno ad incastro di grande elasticità possono ancora resistere singolarmente. Anche i più grandi e sicuri tra i ponti crollano a causa della caduta di pilastri in pietra o del cedimento di quelli in ferro. Argini e dighe vengono completamente staccati l'uno dall'altro, spesso anche per lunghi tratti; binari fortemente piegati e compressi. Tubature nel terreno vengono spaccate e rese irreparabili. Nel terreno si manifestano vari mutamenti di notevole estensione, che sono determinati dalla natura del suolo: si aprono grandi crepe e spaccature, il dissesto in direzione orizzontale e verticale è considerevole soprattutto in terreni morbidi e acquitrinosi. Ne segue il trabocco di acqua che porta sabbia e melma con diverse manifestazioni. Sono frequenti sfaldamenti di terreni e caduta di massi.

XII grado. Grandemente catastrofico: non resiste alcuna opera dell'uomo. Lo sconvolgimento del paesaggio assume aspetti grandiosi. Corsi d'acqua sia superficiali che sotterranei subiscono i mutamenti più vari: si formano cascate, scompaiono laghi, fiumi deviano.

[da Sieberg A., 1930. Geologie der Erdbeben, Handbuch der Geophysik, 2, 4, 552-554]

NOTA IMPORTANTE: la scala Richter e la scala Mercalli-Cancani-Sieberg utilizzando modalità diverse di misurazione, non sono direttamente confrontabili. E' comunque possibile

stilare una tabella comparativa indicativa come la seguente:

INTENSITA'(MCS)	MAGNITUDO (Richter)
III-IV	2.8-3.1
IV	3.2-3.4
IV-V	3.5-3.7
V	3.7-3.9
V-VI	4.0-4.1
VI	4.2-4.4
VI-VII	4.5-4.6
VII	4.7-4.9
VII-VIII	5.0-5.1
VIII	5.2-5.6
IX	5.7-6.1
X-XI	6.2

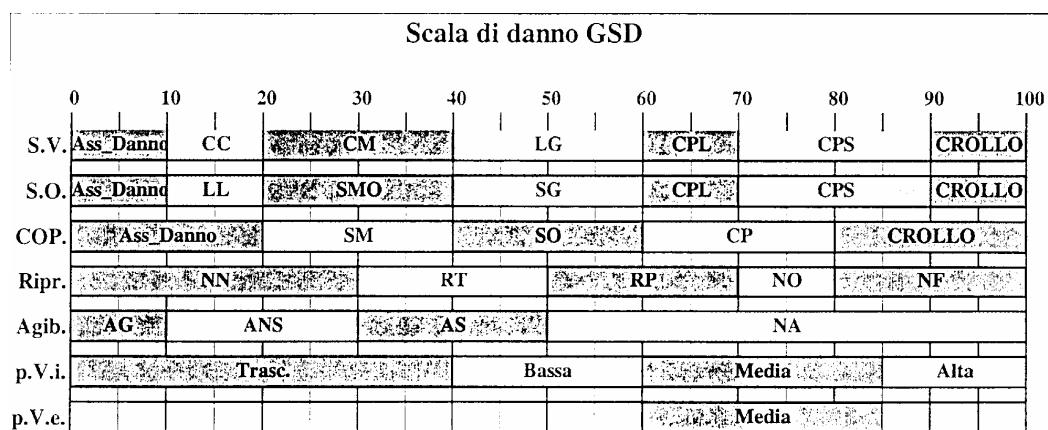
(Fonte: Istituto Nazionale di Geofisica, Conoscere il Terremoto, Giugno 1999)

APPENDICE G

Scala dei Giudizi Sintetici di Danno (GSD)

La scala GSD (Grimaz et al., 1996) fornisce una valutazione quantitativa del danno subito da un edificio in muratura a seguito di un'attività sismica. La peculiarità di questa scala è quella di conservare le informazioni riguardanti lo scenario di danneggiamento.

Nelle valutazioni, la chiave di lettura è il dissesto (lesioni con relative gradazioni), visto in un'ottica di compromissione di funzionalità (tipo e grado di compromissione). In tale contesto vengono effettuate valutazioni di ripristinabilità (intesa come fattibilità e opportunità strutturale) e di agibilità (capacità dell'edificio di reggere a repliche sismiche di pari intensità).



Legenda

Strutture Verticali (S.V.)

Ass_Danno	Assenza Danno
CC	Crepe Capillari
CM	Crepe Moderate
LG	Lesioni Gravi
CPL	Crolli Parziali Localizzati (< 50%)
CPS	Crolli Parziali Significativi (> 50%)
CROLLO	Crollo Totale

Strutture Orizzontali (S.O.)

Ass_Danno	Assenza Danno
LL	Lesioni Lievi
SMO	Sconnessioni Moderate
SG	Sconnessioni Gravi
CPL	Crolli Parziali Localizzati (< 50%)
CPS	Crolli Parziali Significativi (> 50%)
CROLLO	Crollo Totale

Coperture (COP.)

Ass_Danno	Assenza Danno
SM	Sconnessione Manto Copertura
SO	Sconnessione Orditura Copertura
CP	Crolli Parziali
CROLLO	Crollo Totale

Ripristinabilità (Ripr.)

NN	Non Necessaria
RT	Ripristinabile Totalmente
RP	Ripristinabile Parzialmente
NO	Non Opportuna
NF	Non Fattibile

Agibilità (Agib.)

AG	Agibile
ANS	Agibile con provvedimenti Non Strutturali
AS	Agibile con provvedimenti Strutturali
NA	Non Agibile

Prob.Vittime INTERNE edificio (p.V.i.)

Trasc.	Probabilità Trascurabile
Bassa	Probabilità Bassa
Media	Probabilità Media
Alta	Probabilità Alta

Prob.Vittime ESTERNE edificio (p.V.e.)

Media	Probabilità Media
-------	-------------------

Fig.G1 Scala di danno GSD.

APPENDICE H
Grafici relativi allo studio
dei fenomeni franosi

H1 Grafici delle leggi di attenuazione.

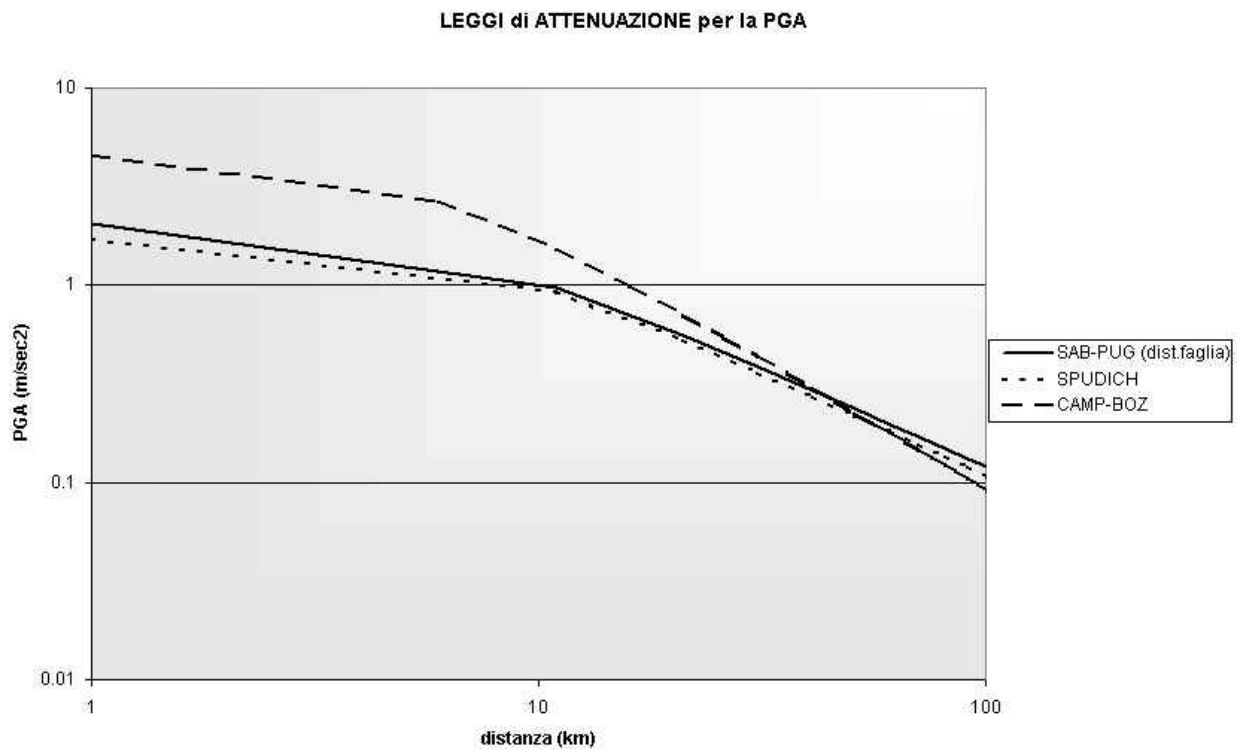


Fig.H1 Confronto tra le leggi d attenuazione per il parametro PGA

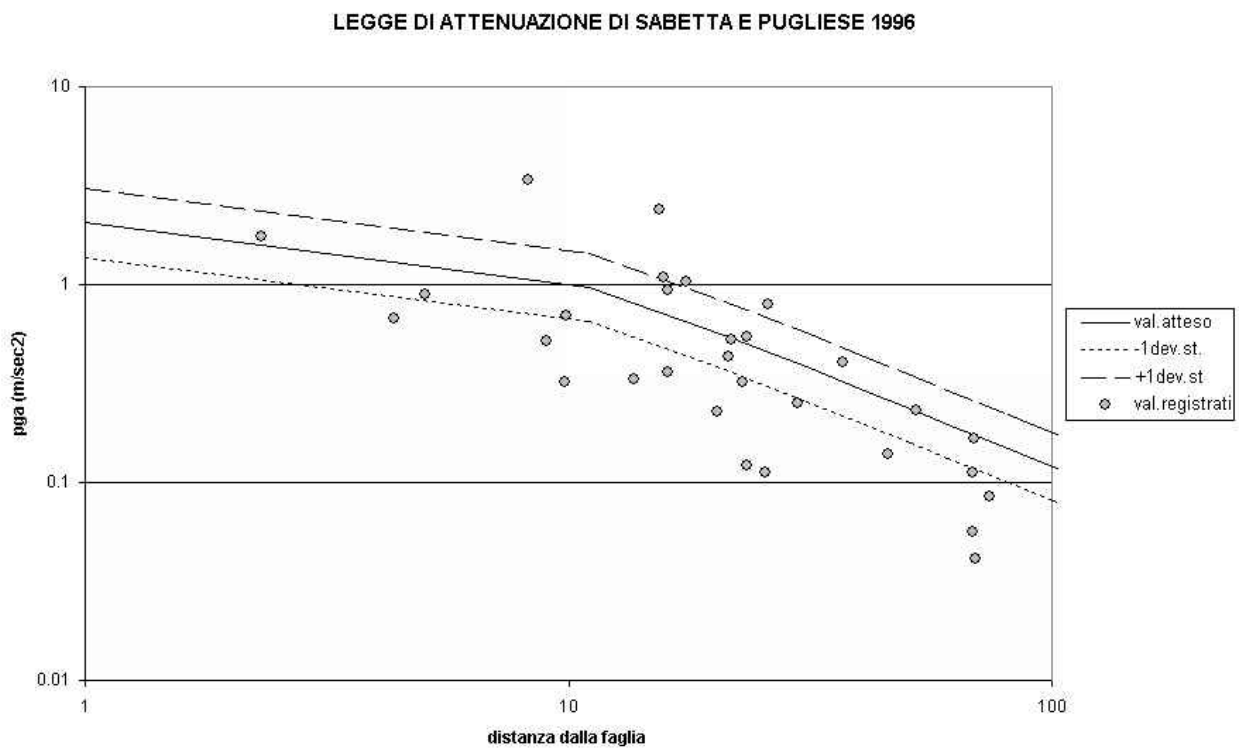


Fig.H2 Legge di Sabetta e Pugliese (1996) per i parametri PGA e distanza dalla faglia

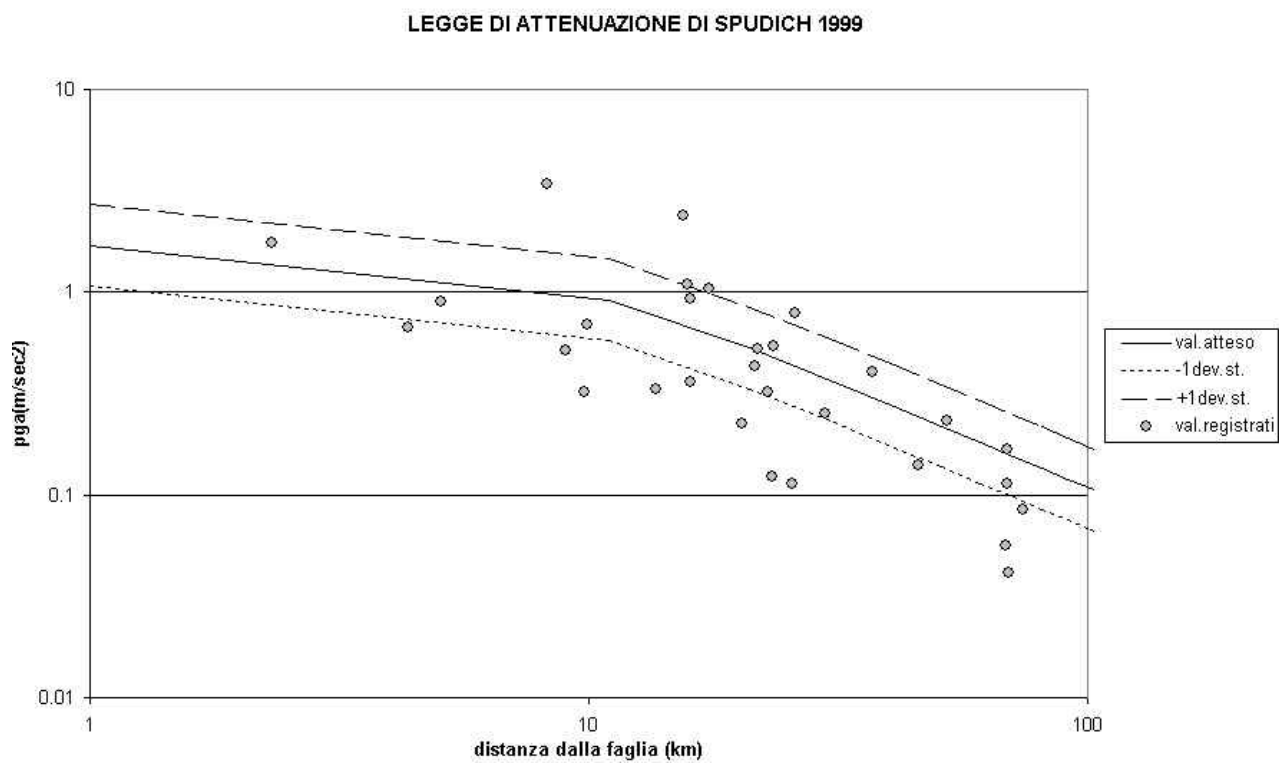


Fig.H3 Legge di Spudich (1999) per i parametri PGA e distanza dalla faglia

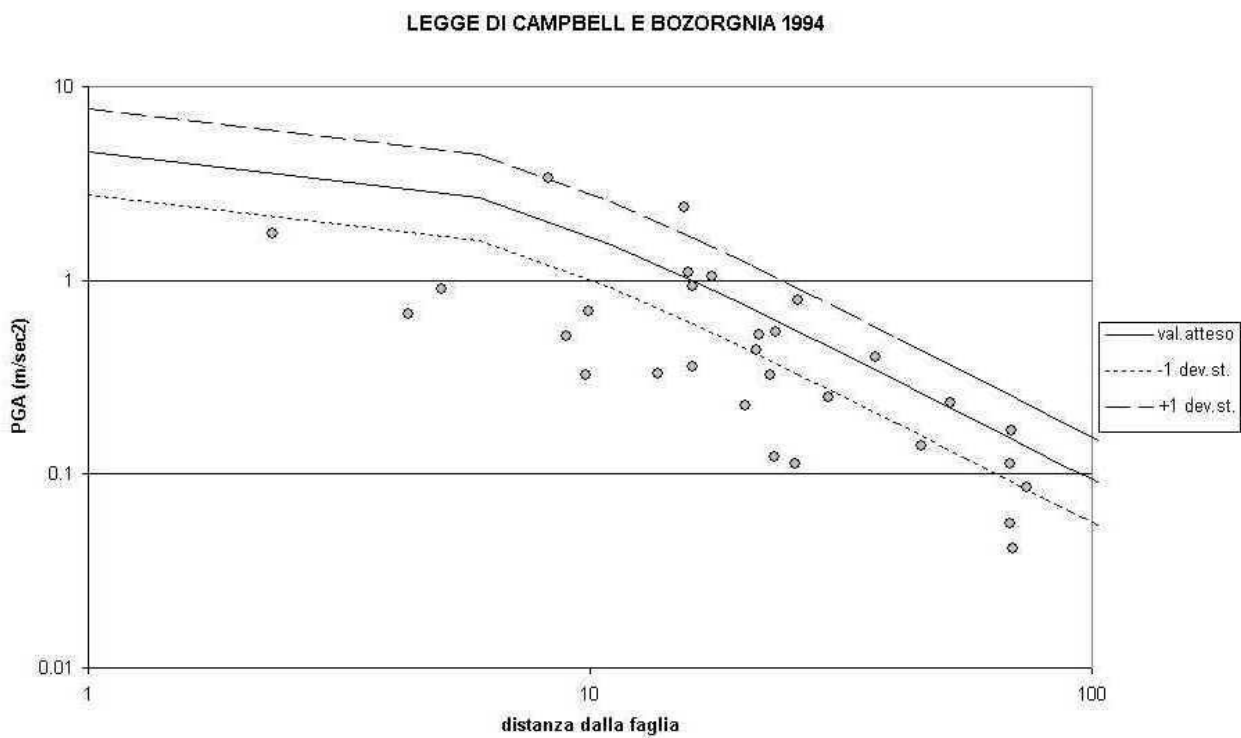


Fig.H4 Legge di Campbell e Bozorgnia (1994) per i parametri PGA e distanza dalla faglia

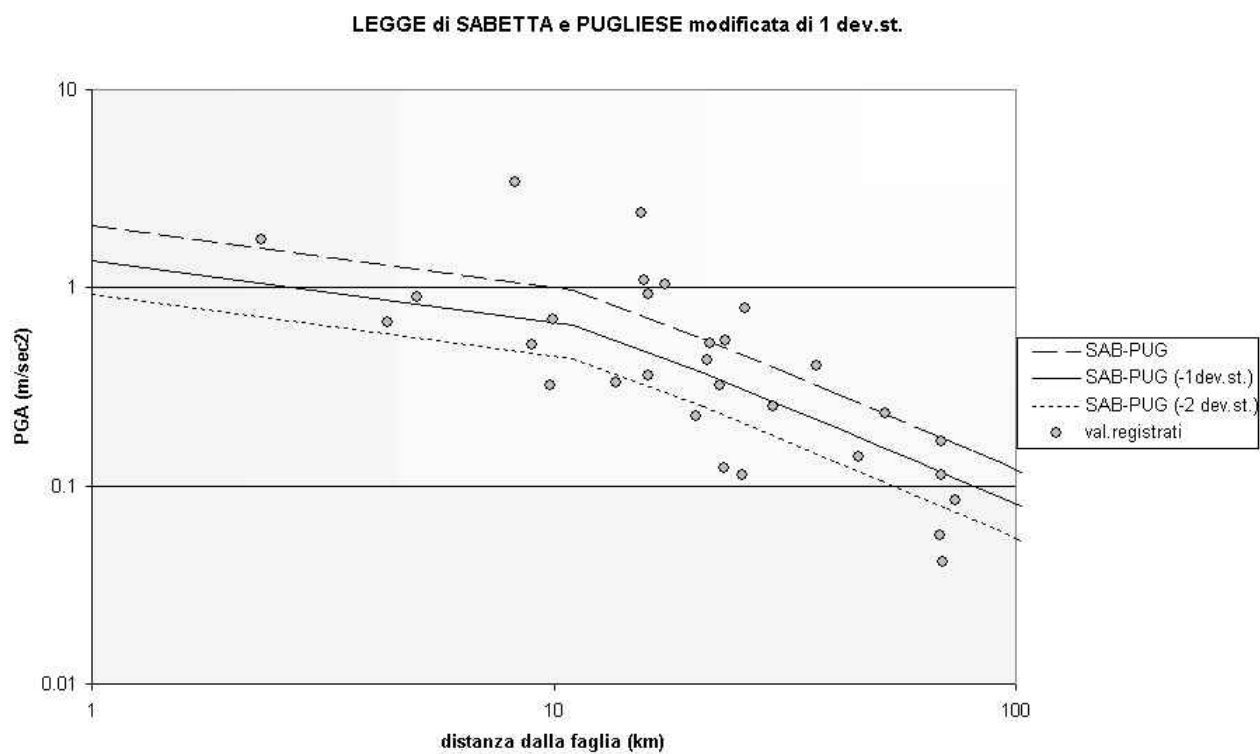


Fig.H5 Legge di Sabetta e Pugliese (1996) per i parametri PGA e distanza dalla faglia, modificata di una deviazione standard.

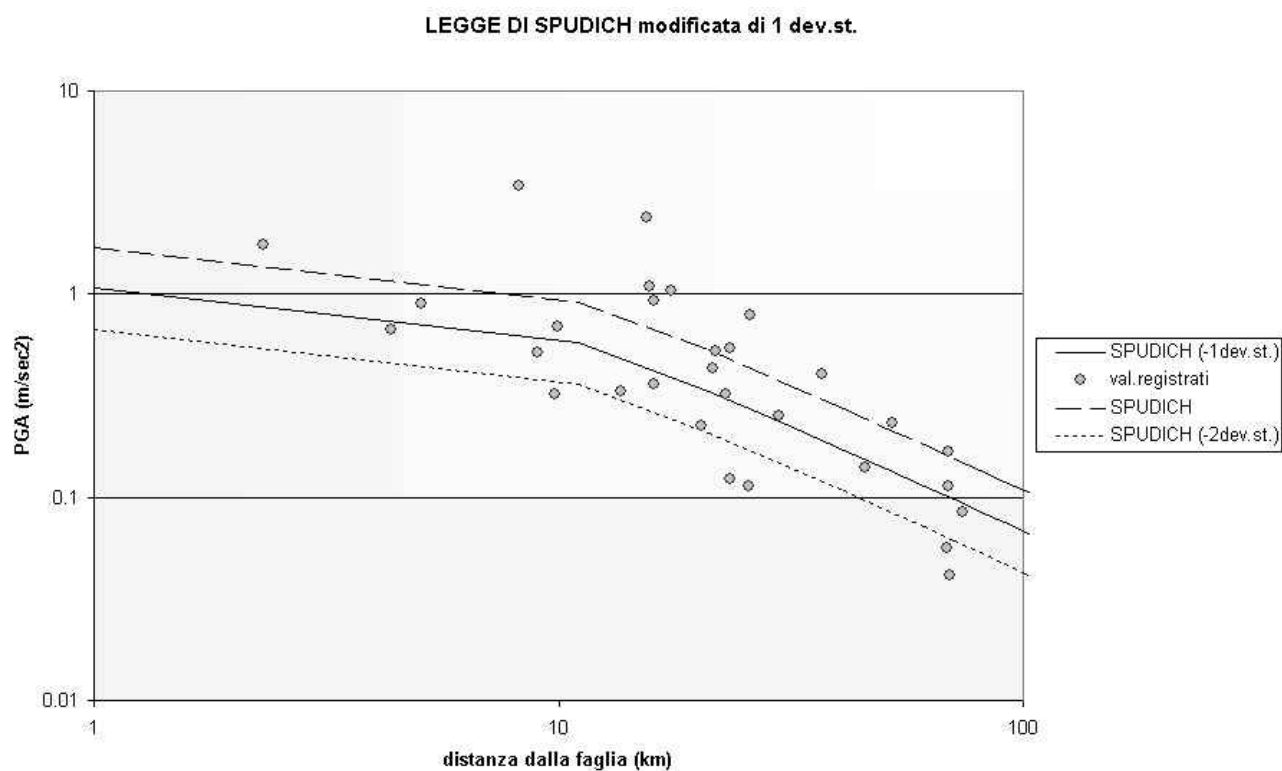


Fig.H6 Legge di Spudich (1999) per i parametri PGA e distanza dalla faglia modificata

di una deviazione standard

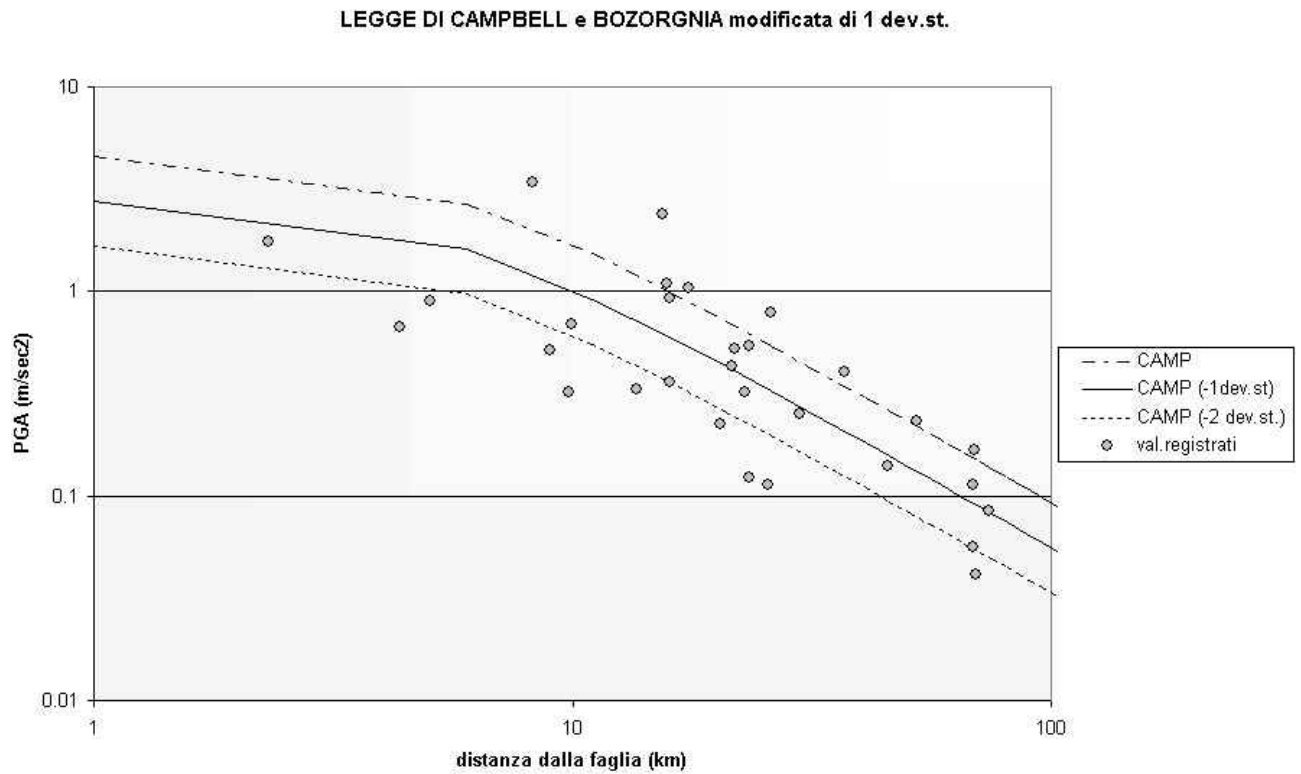
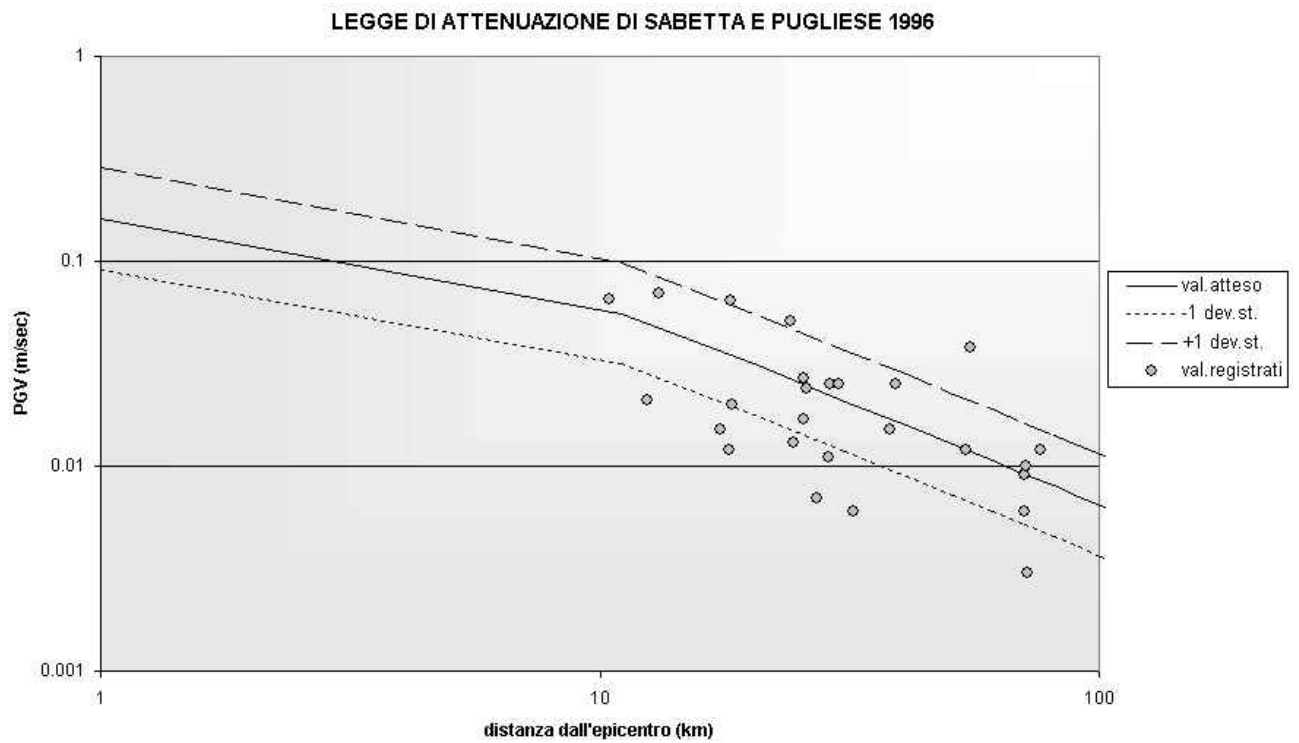


Fig. H7 Legge di Campbell e Bozorgnia (1984) per i parametri PGA e distanza dalla faglia modificata di una deviazione standard



FigH8 Legge di Sabetta e Pugliese (1996) per i parametri PGV e distanza dall'epicentro

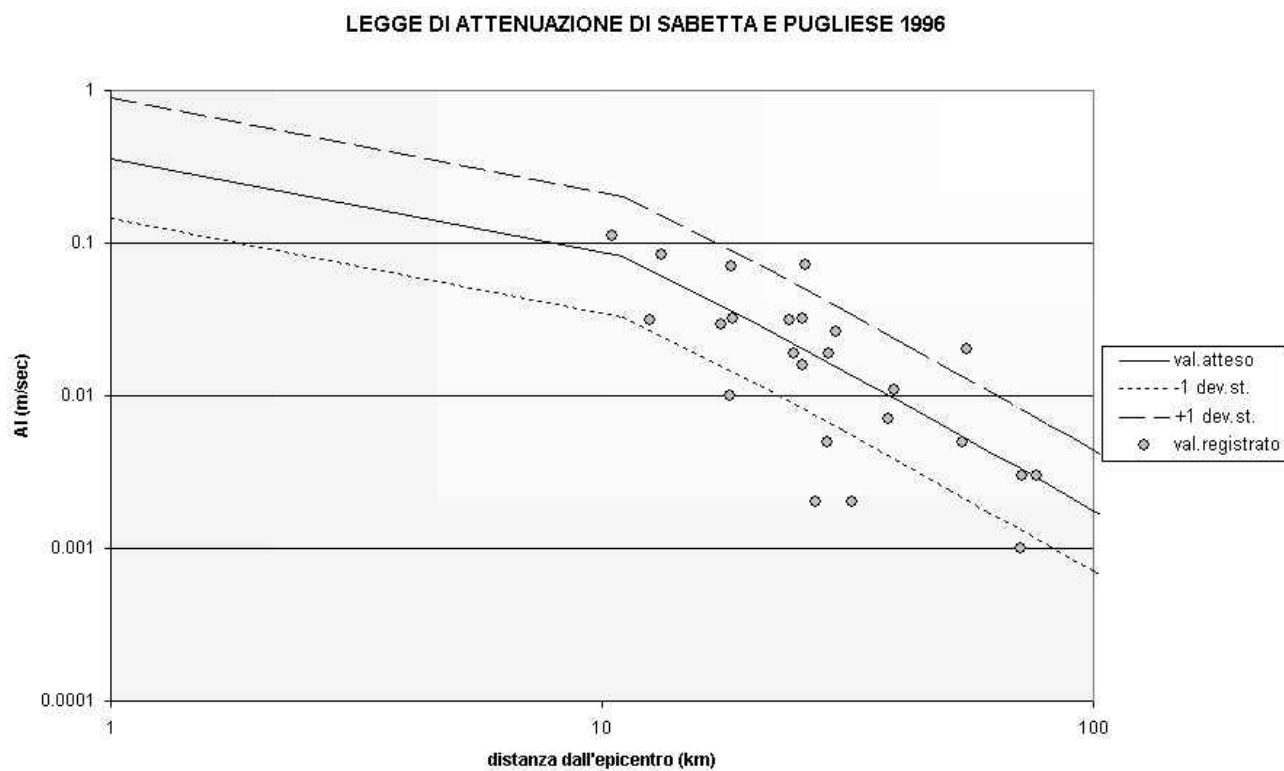
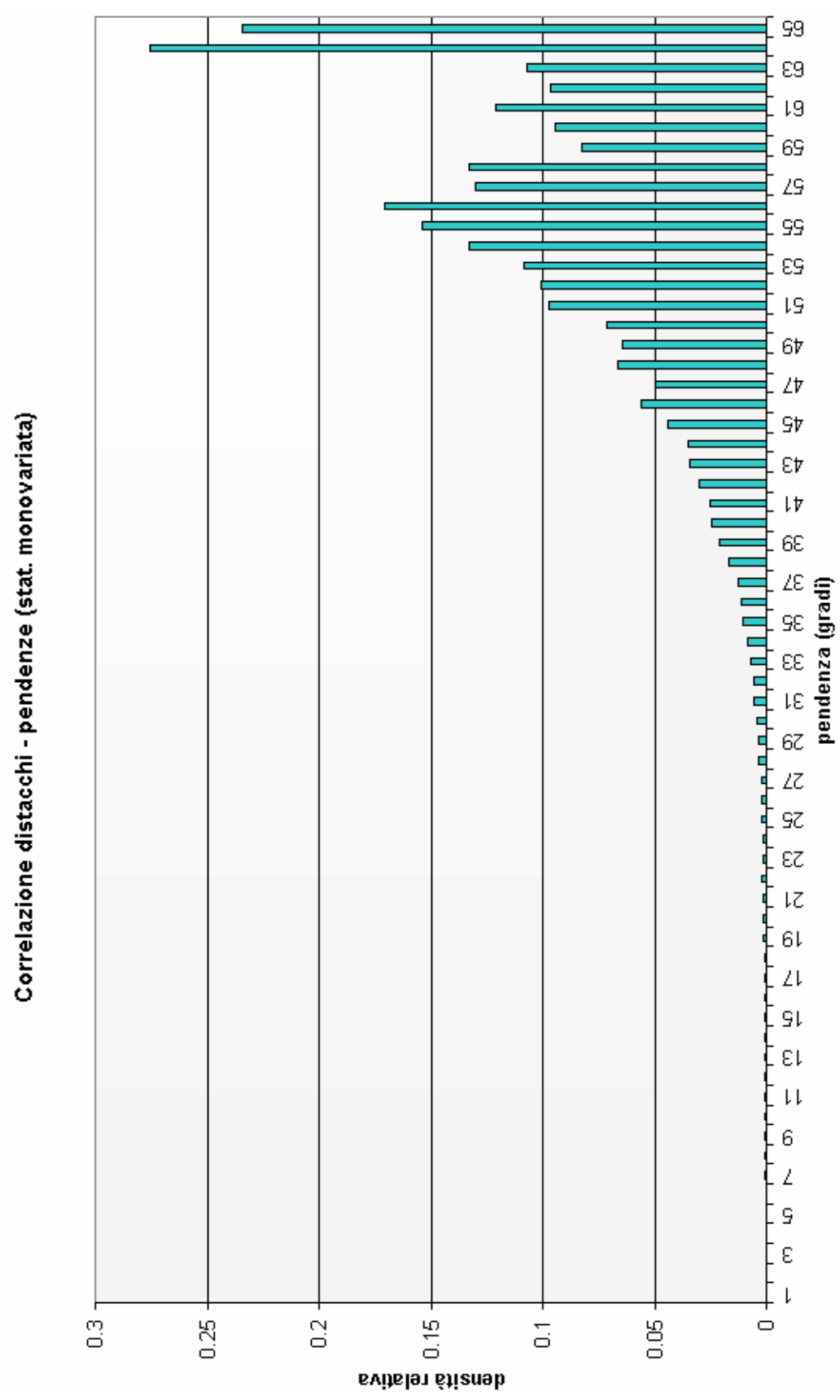
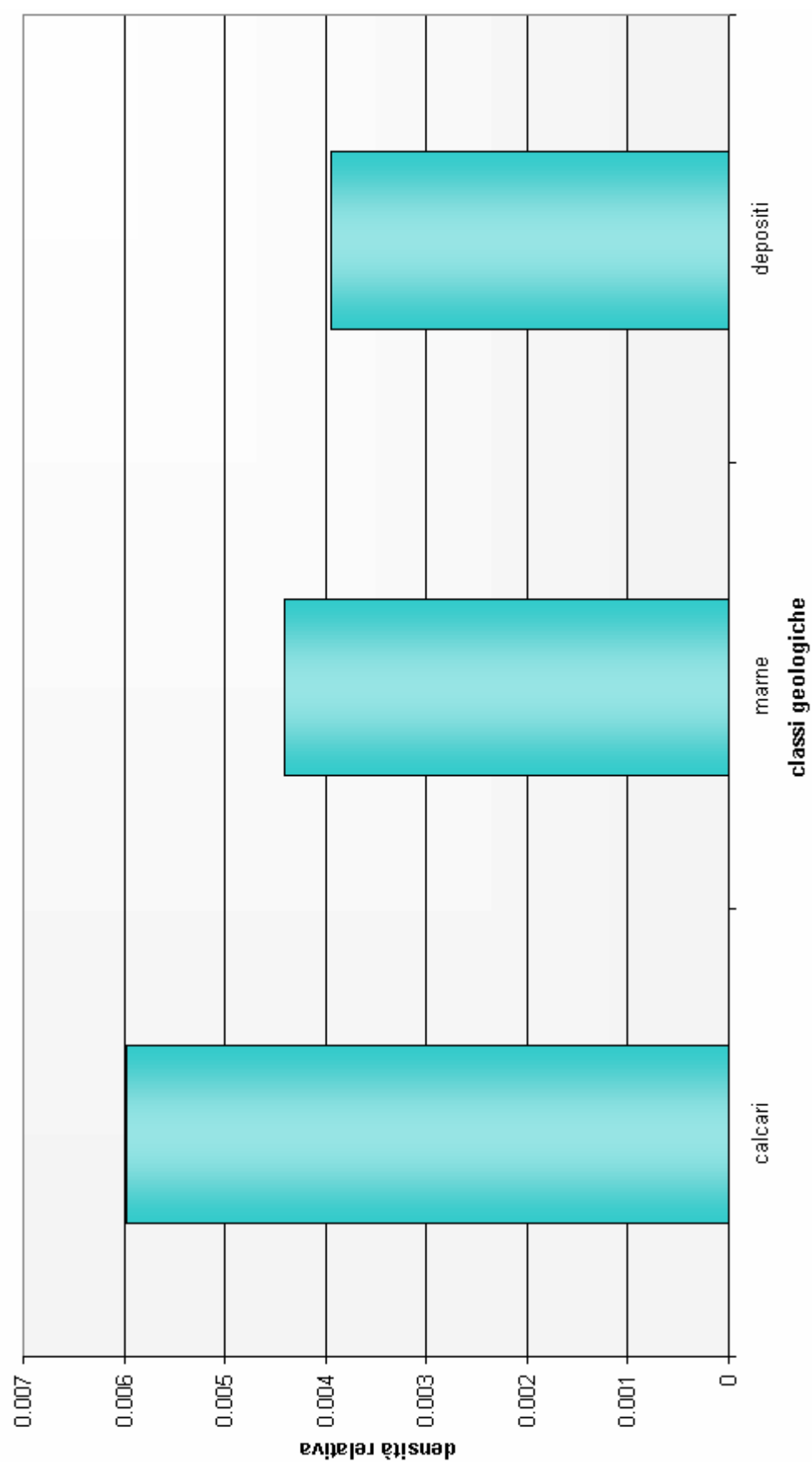


Fig.H9 Legge di Sabetta e Pugliese (1996) per i parametri AI e distanza dall'epicentro

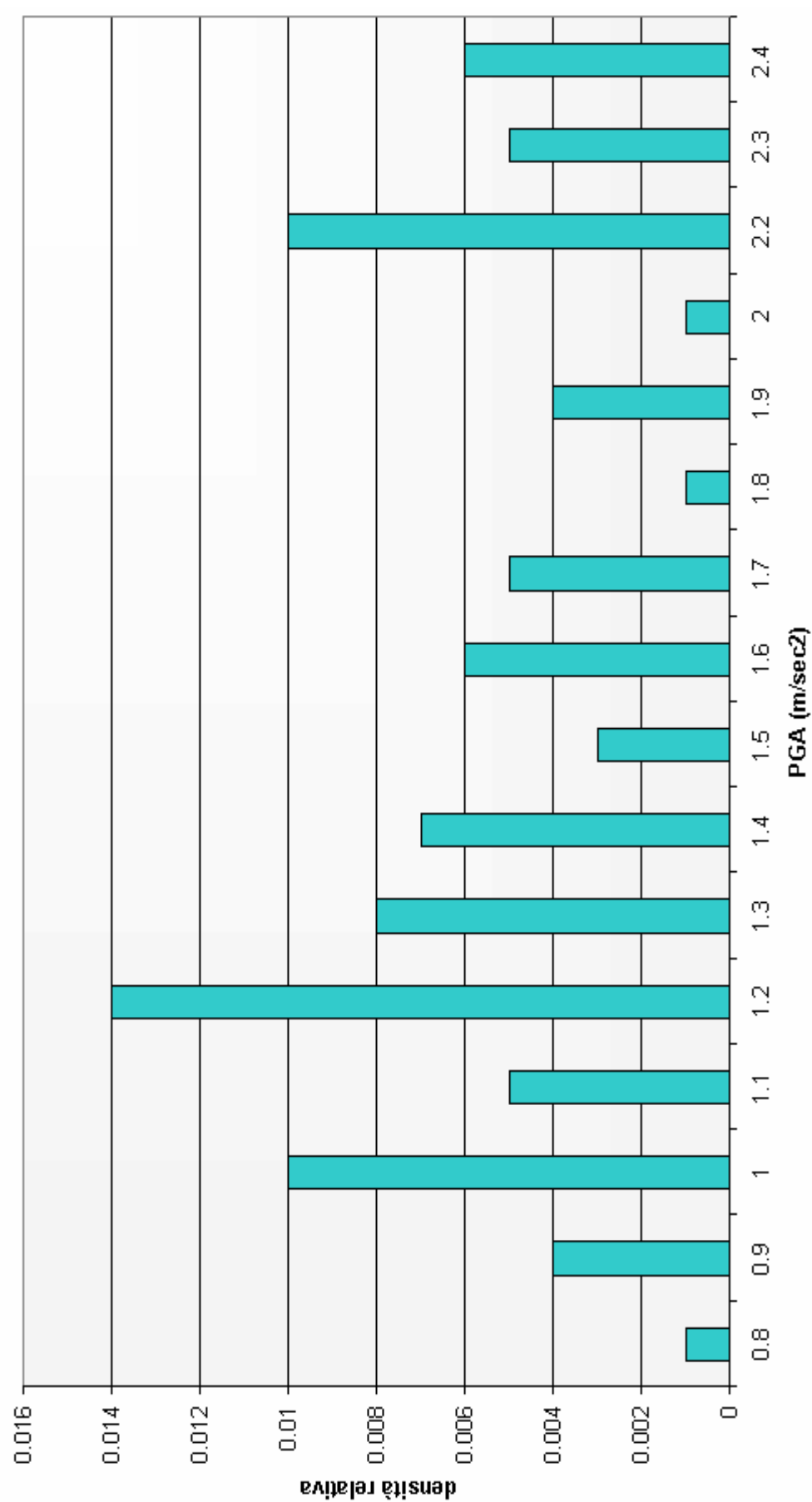
H2 Grafici delle correlazioni tra mappe parametriche e frane di crollo.



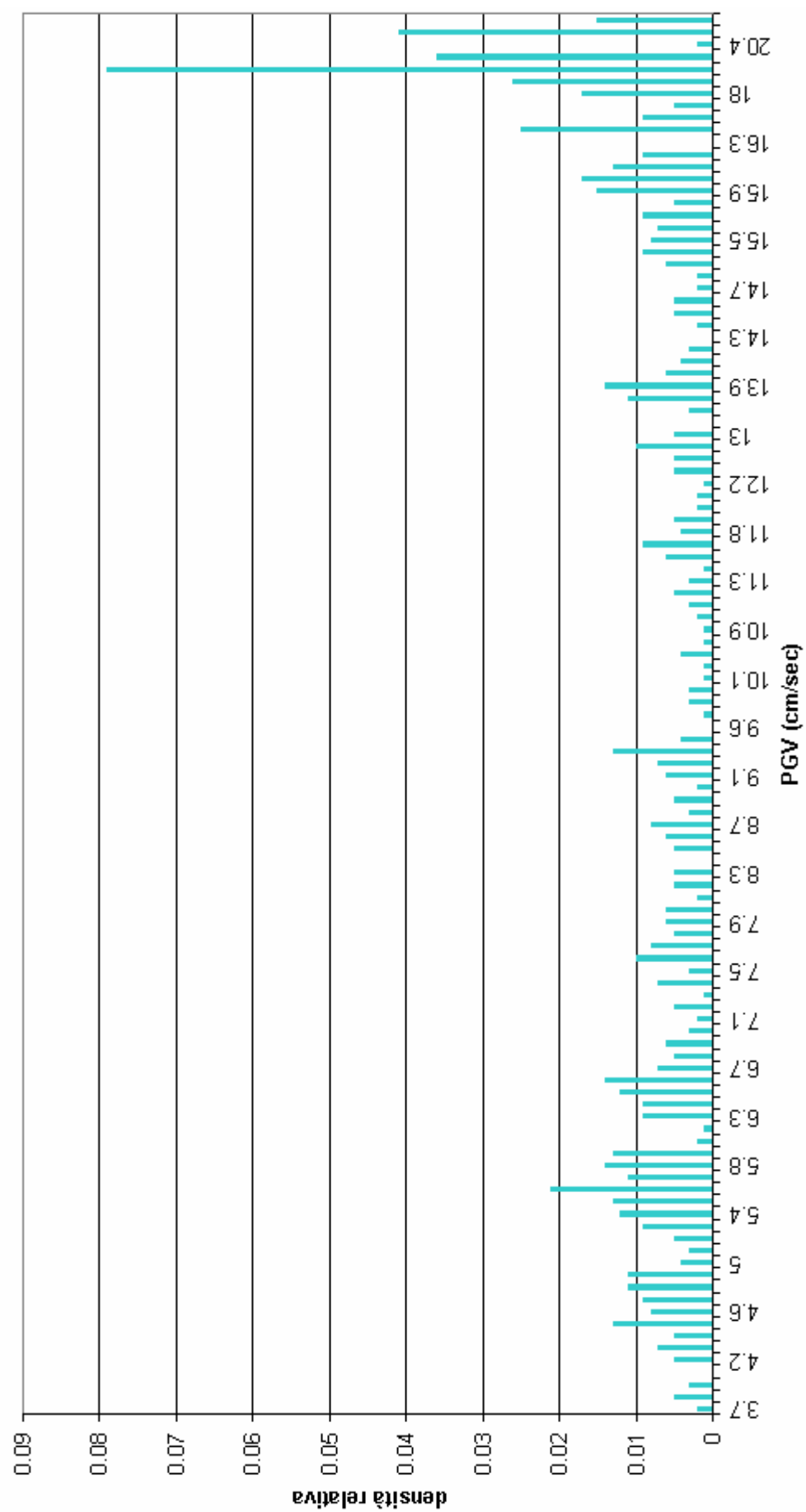
Correlazione distacchi - geologia (stat. monovariata)



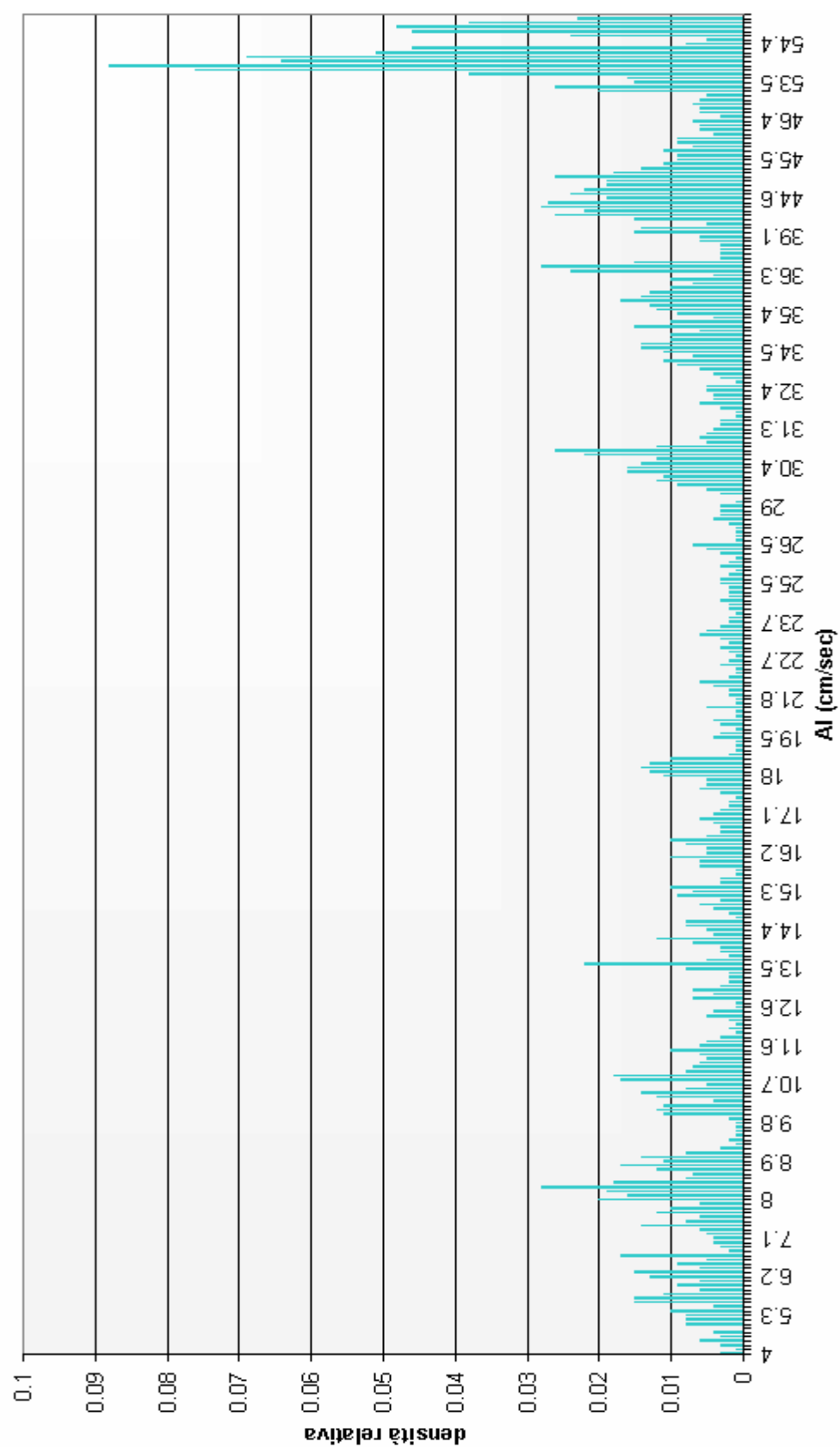
Correlazione distacchi - PGA (stat. monovariata)



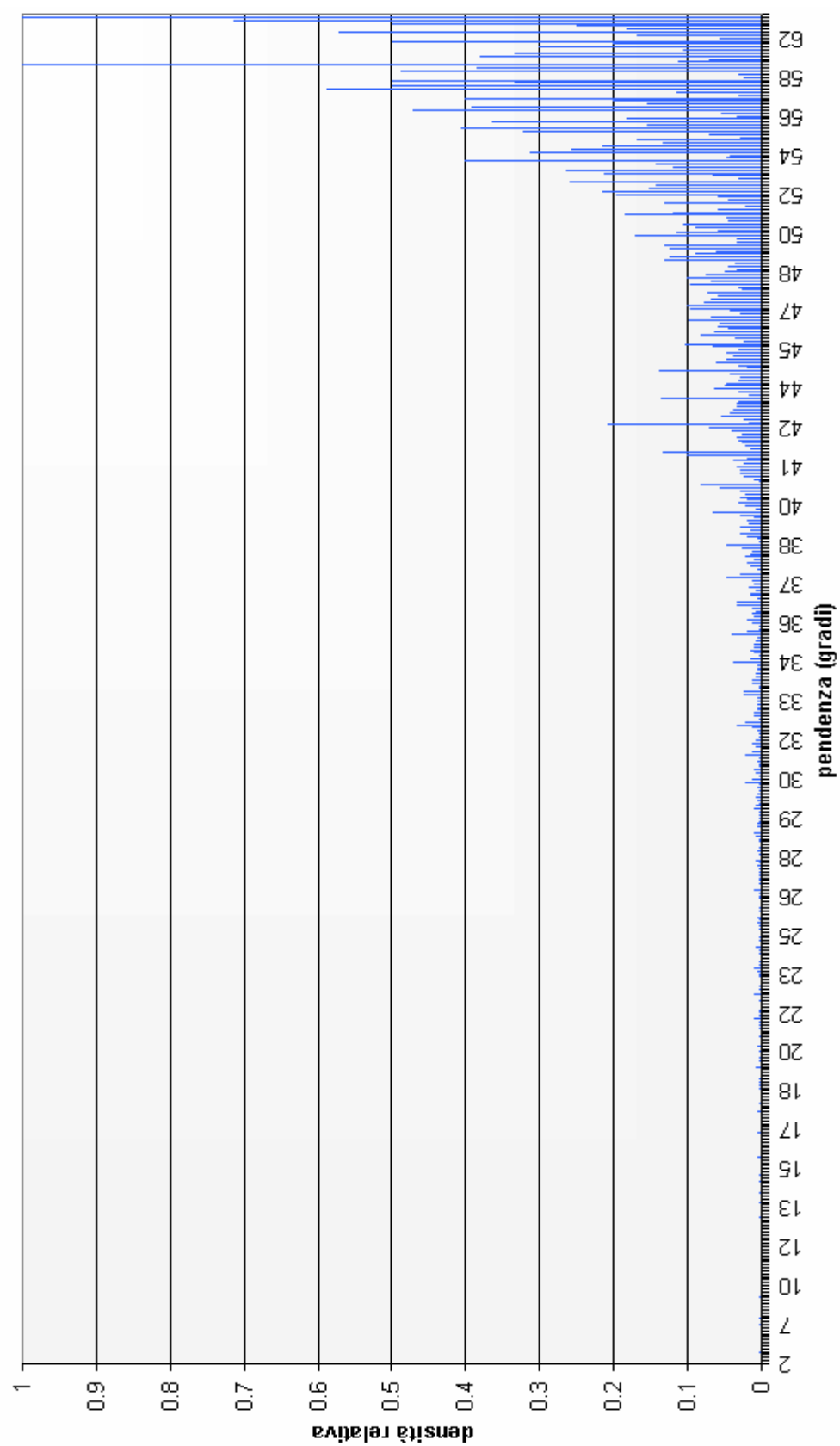
Correlazione distacchi - PGV (stat. monovariata)



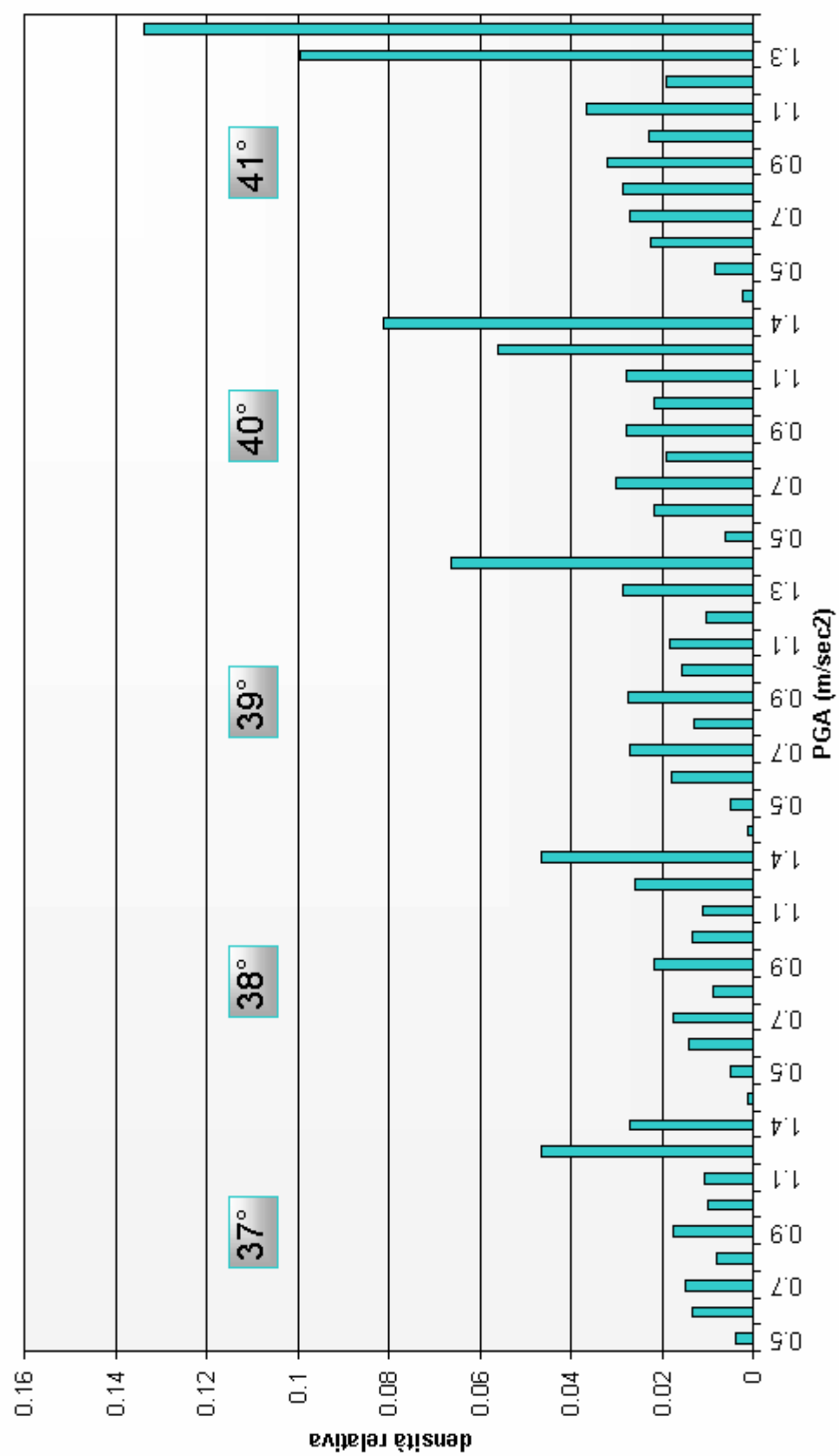
Correlazione tra distacchi - Al (stat. monovariata)



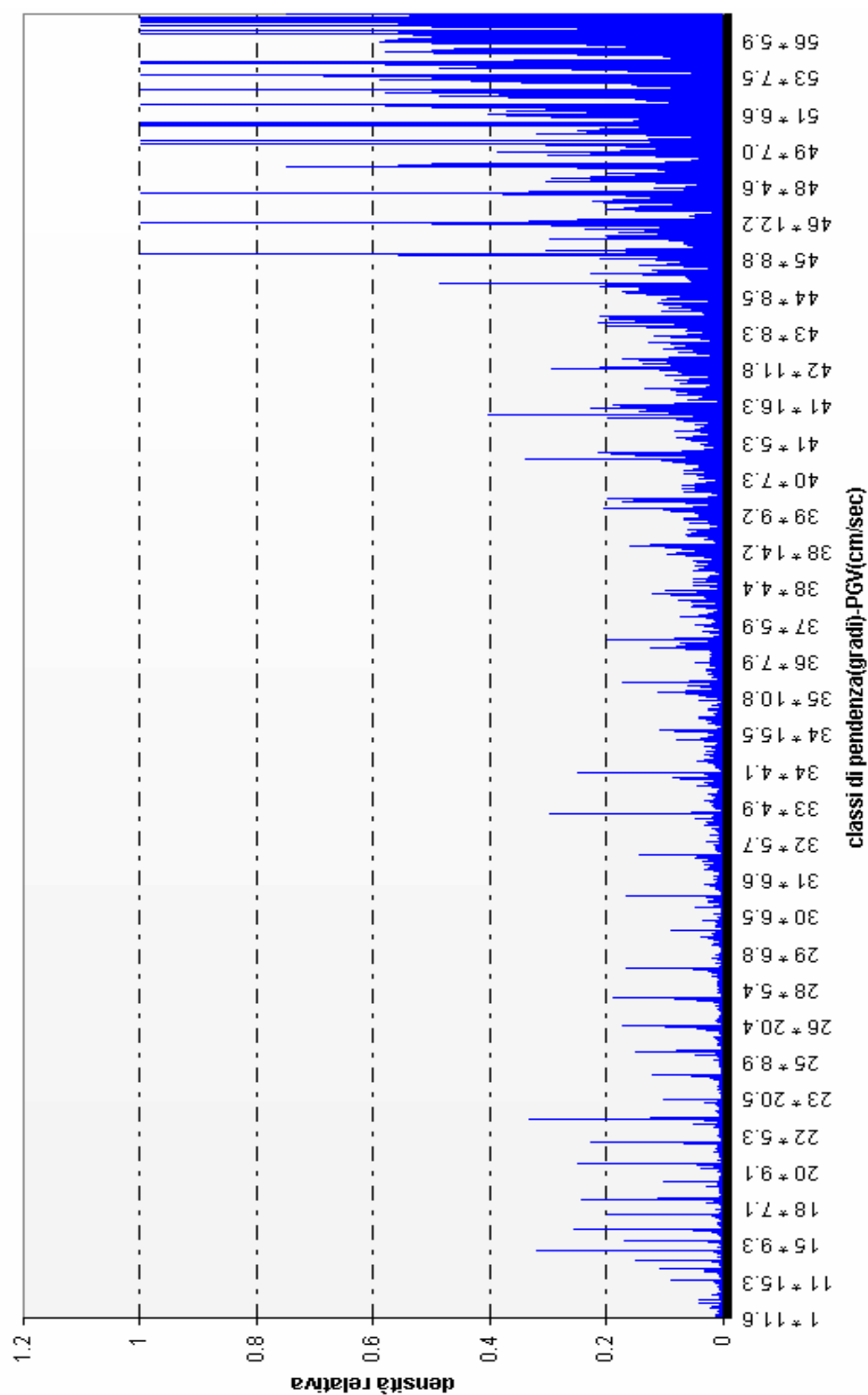
Correlazione tra densità relativa e classi pendenza-PGA

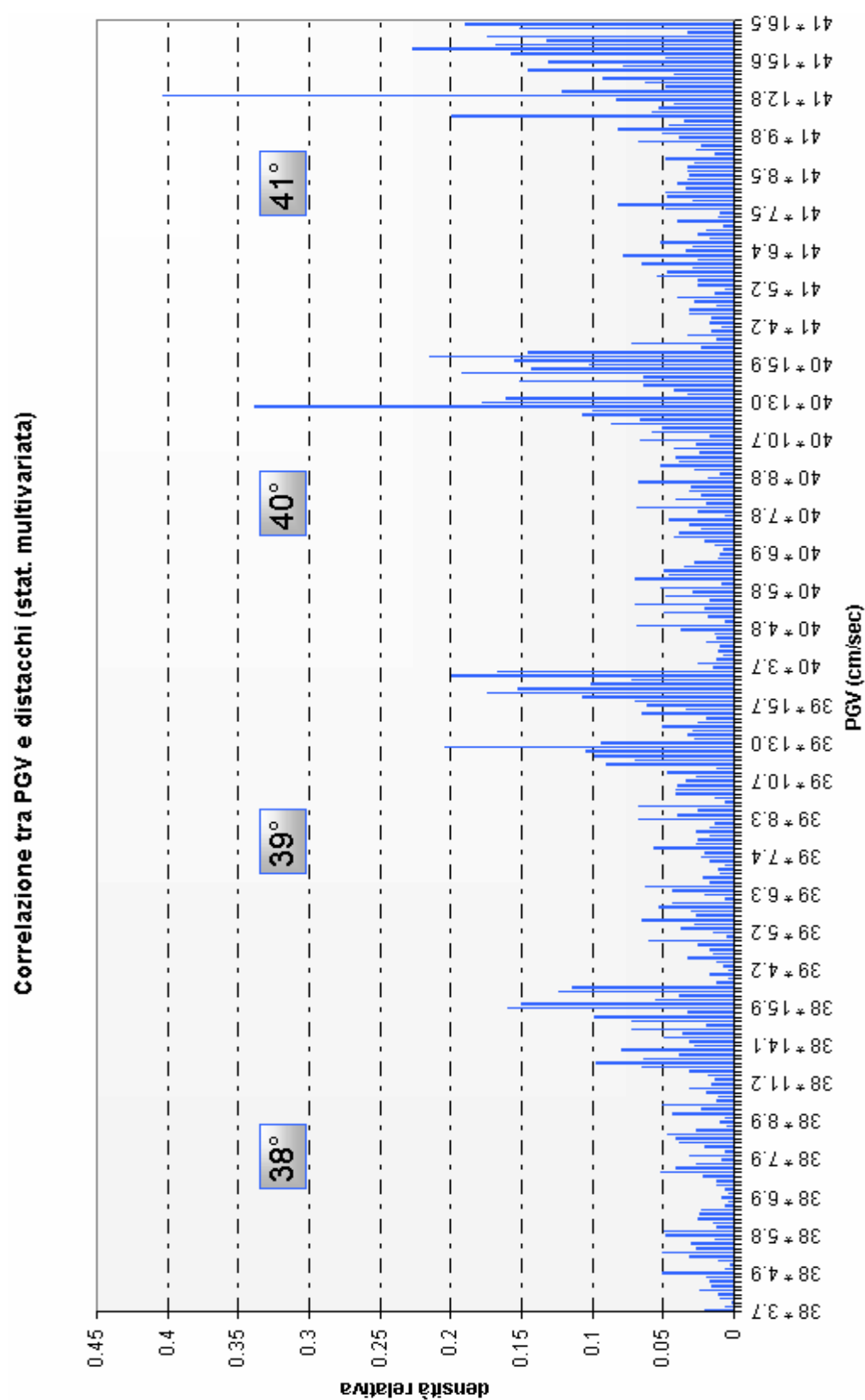


Correlazione tra PGA e distacchi (stat. multivariata)

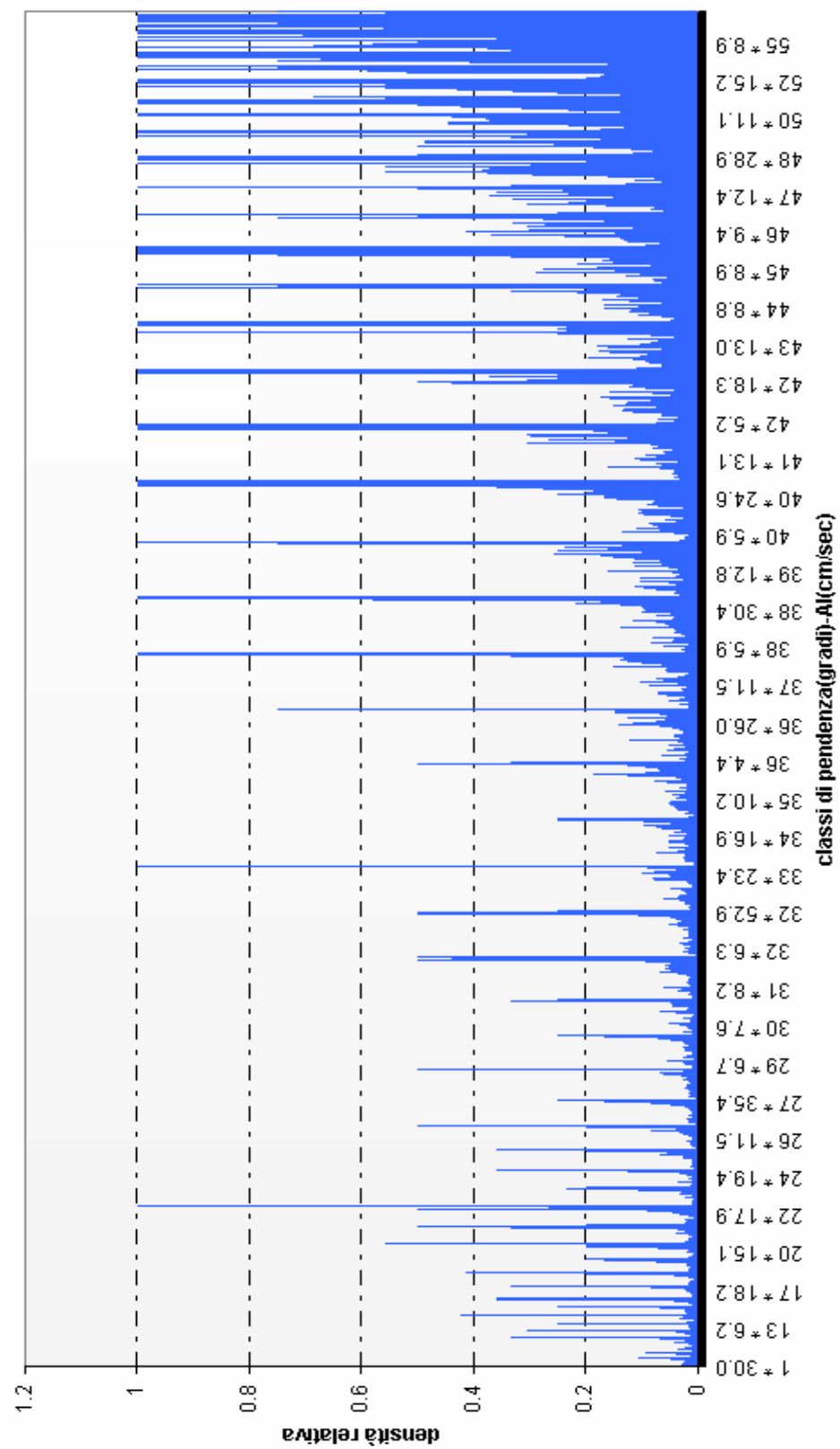


Correlazione tra densità relativa e classi pendenze-PGV

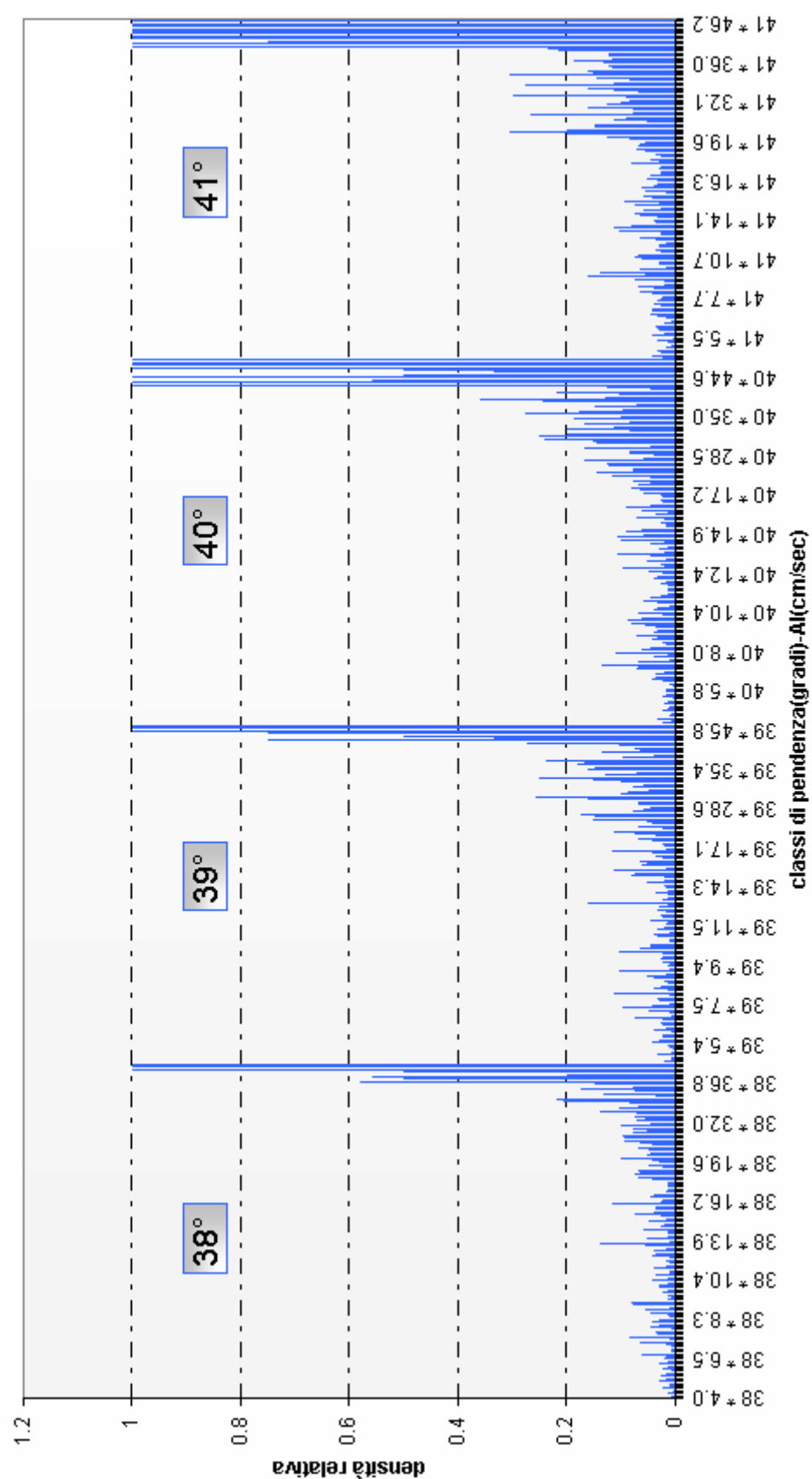




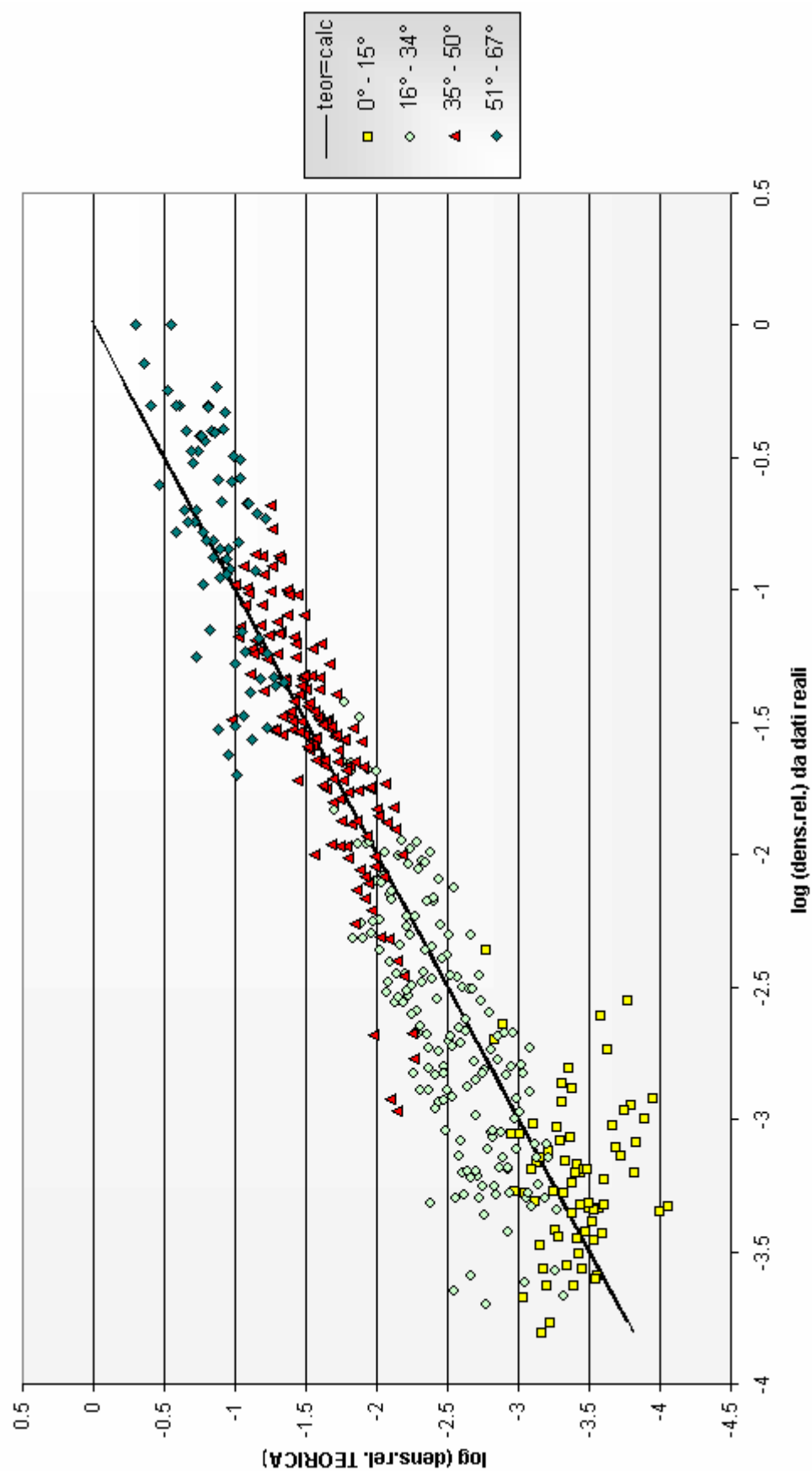
Correlazione tra densità relativa e classi pendenza-AI



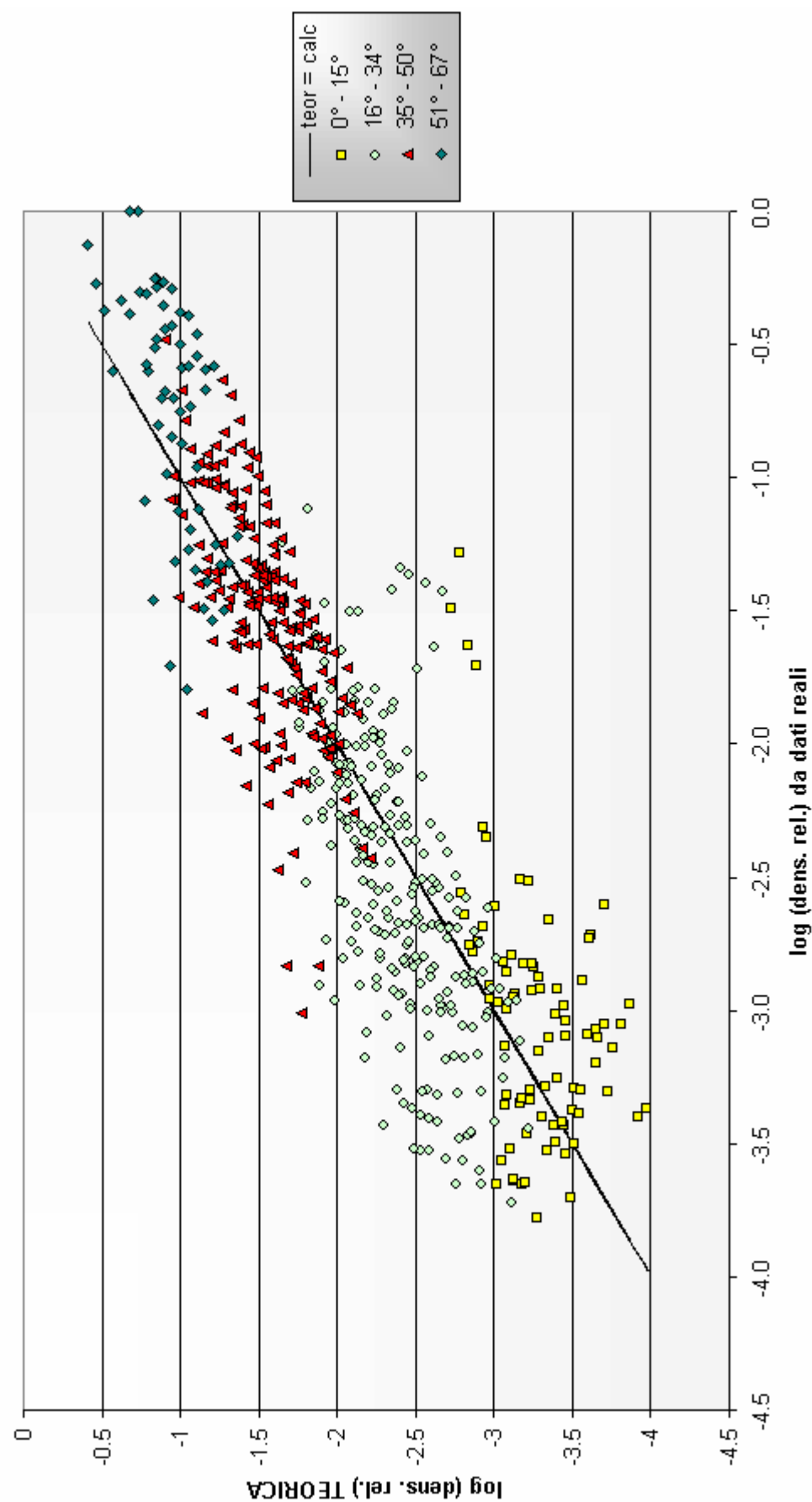
Correlazione tra AI e distacchi (stat. multivariata)



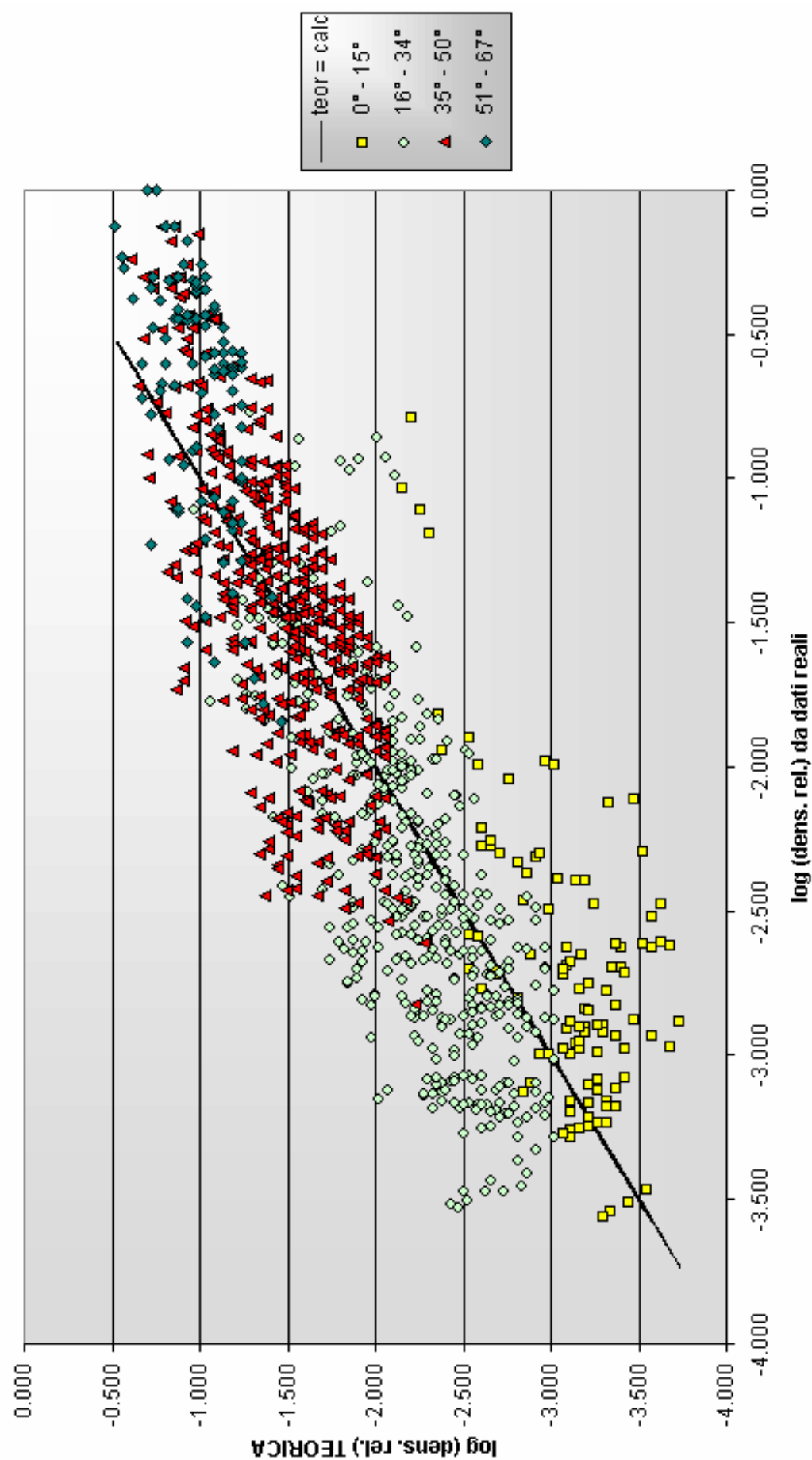
DENSITA' RELATIVA da Dati Reali contro TEORICA (regr. Log Dr = a S + b PGA + c)



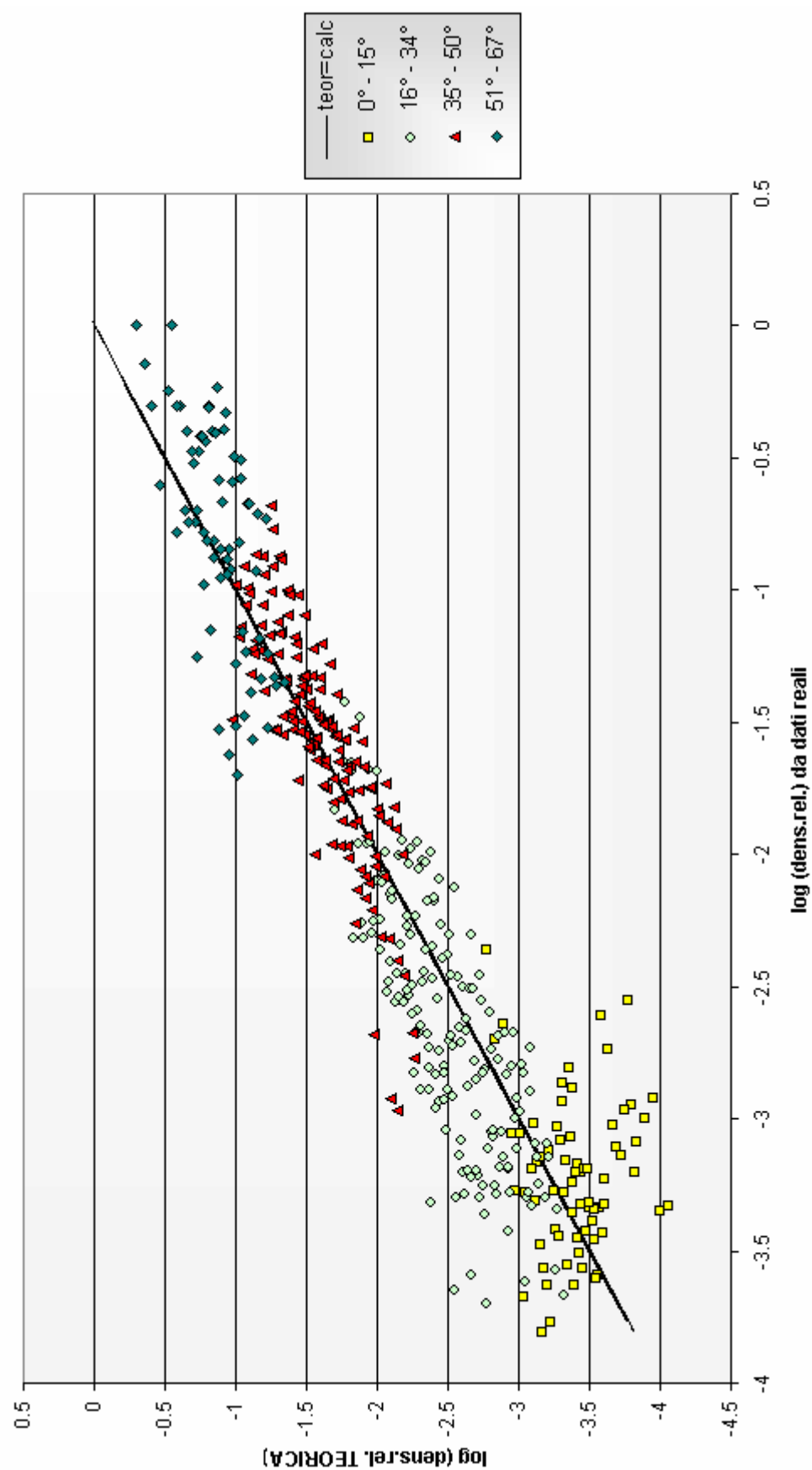
DENSITA' RELATIVA da Dati Reali contro TEORICA con la PGV (regr. $\text{Log Dr} = a + b \log \text{PGV} + c$)



DENSITA' RELATIVA da Dati Reali contro TEORICA (regr. LOG Dr = a S + b LOG AI + c)



DENSITA' RELATIVA da Dati Reali contro TEORICA (regr. Log Dr = a S + b PGA + c)



APPENDICE I

**Grafici relativi alla vulnerabilità
degli edifici in muratura**

I1 Edifici in buono stato di manutenzione.

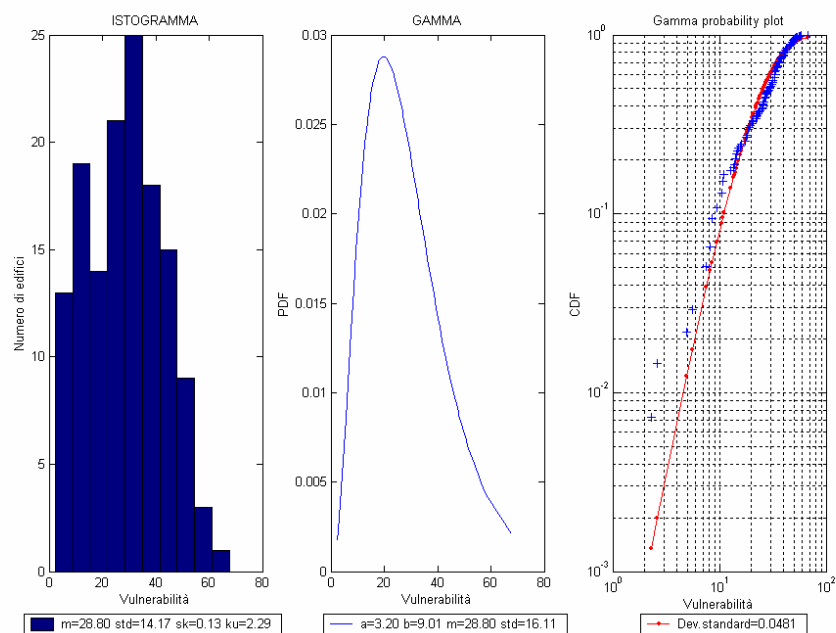
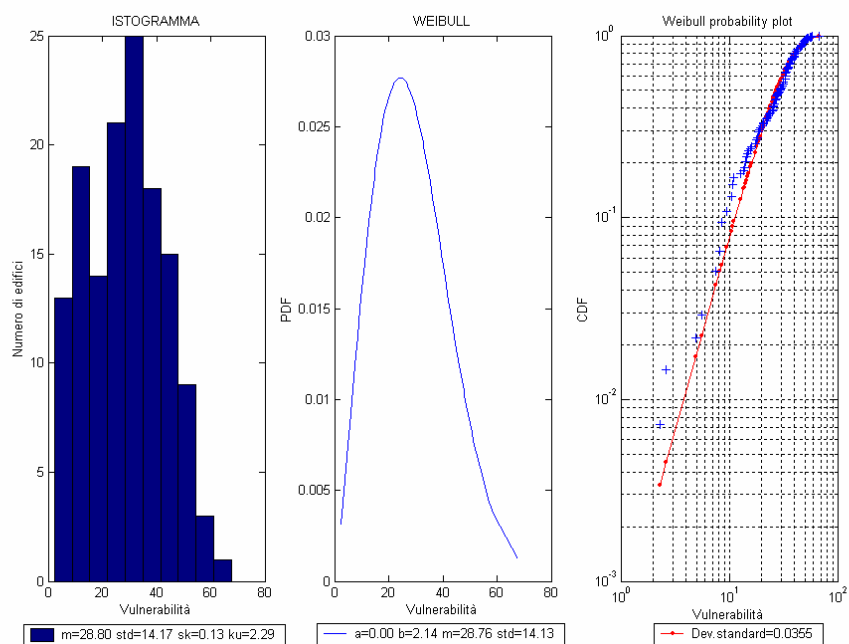


Fig.11 Edifici con 1 o 2 piani, età precedente al 1919.

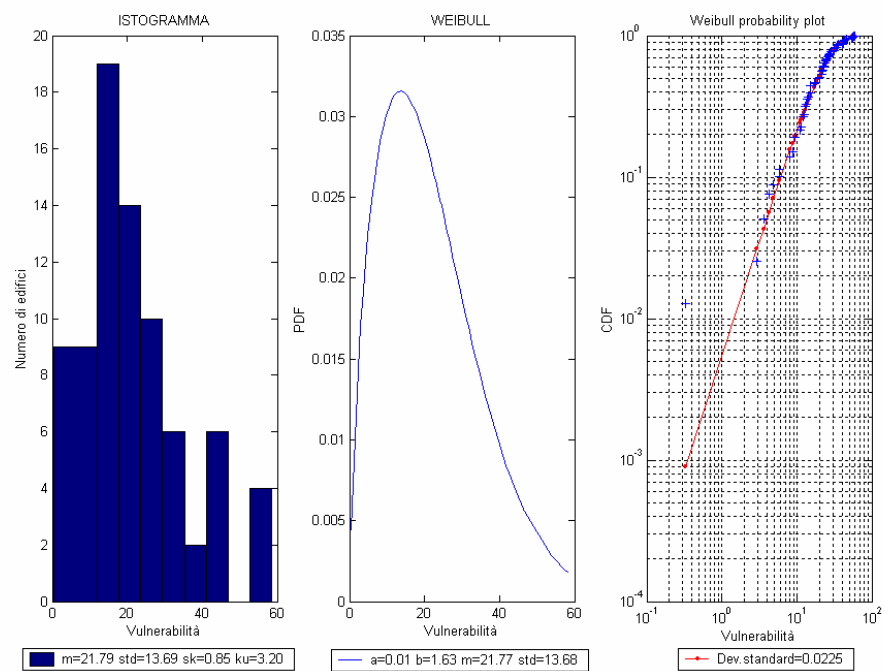
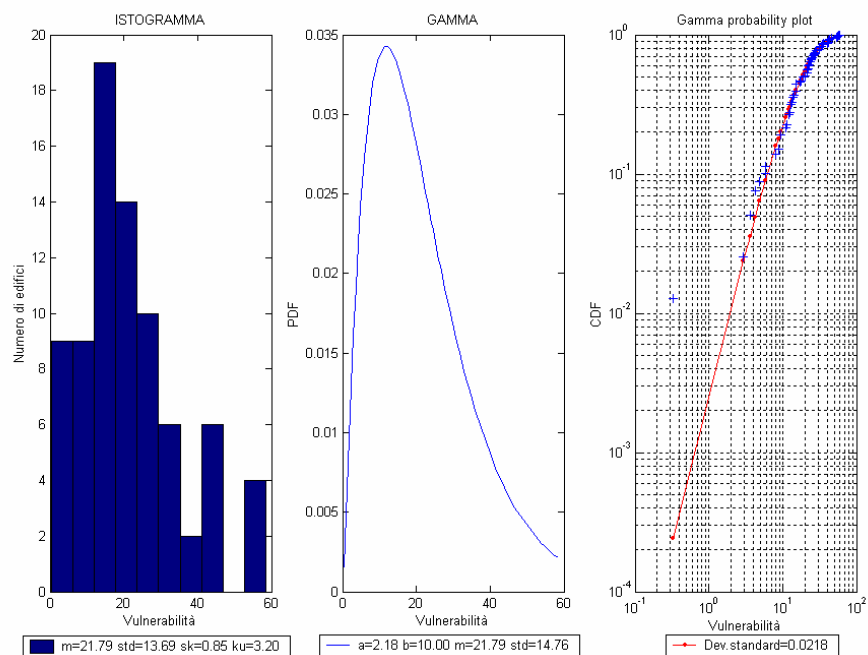


Fig.I2 Edifici con 1 o 2 piani, età dal 1919 al 1945.

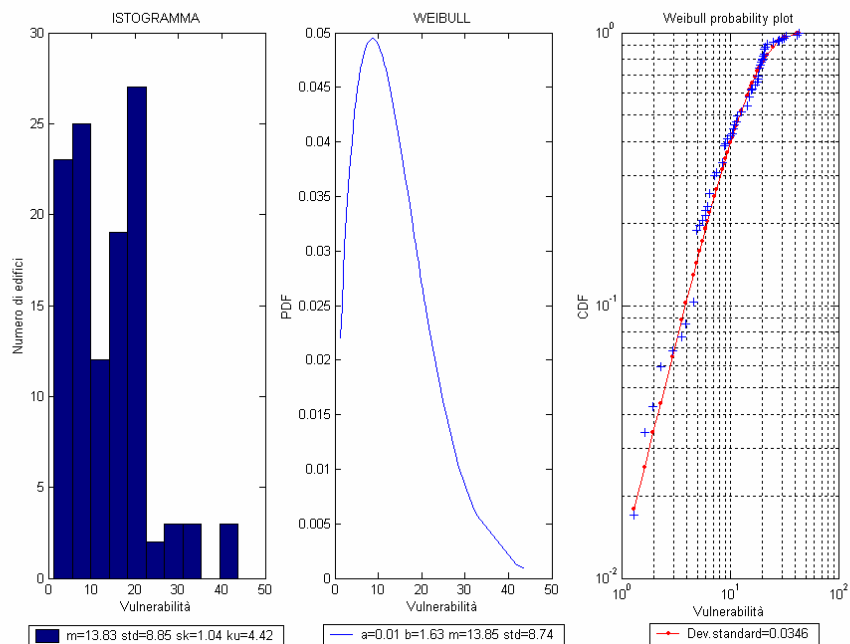
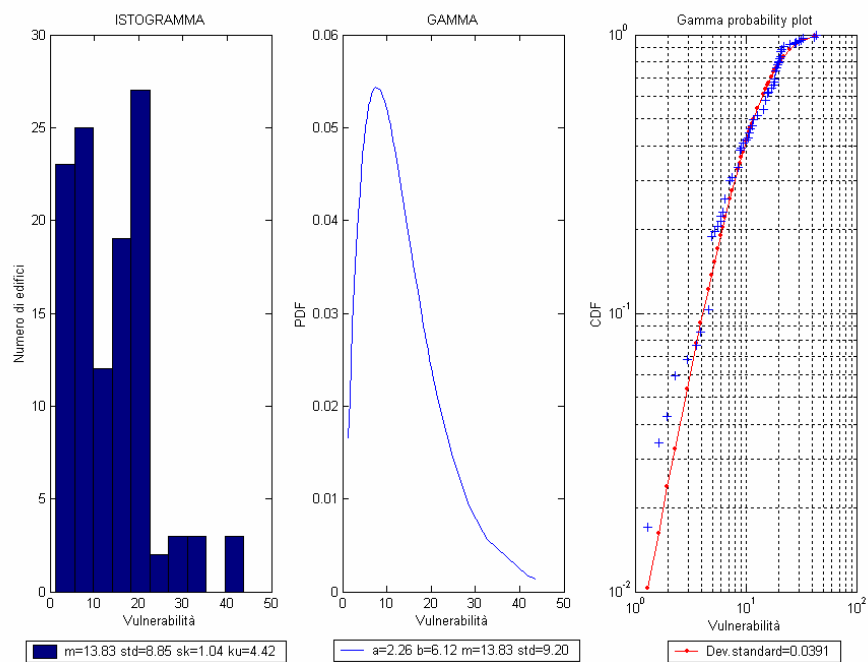


Fig.13 Edifici con 1 o 2 piani, età dal 1946 al 1960.

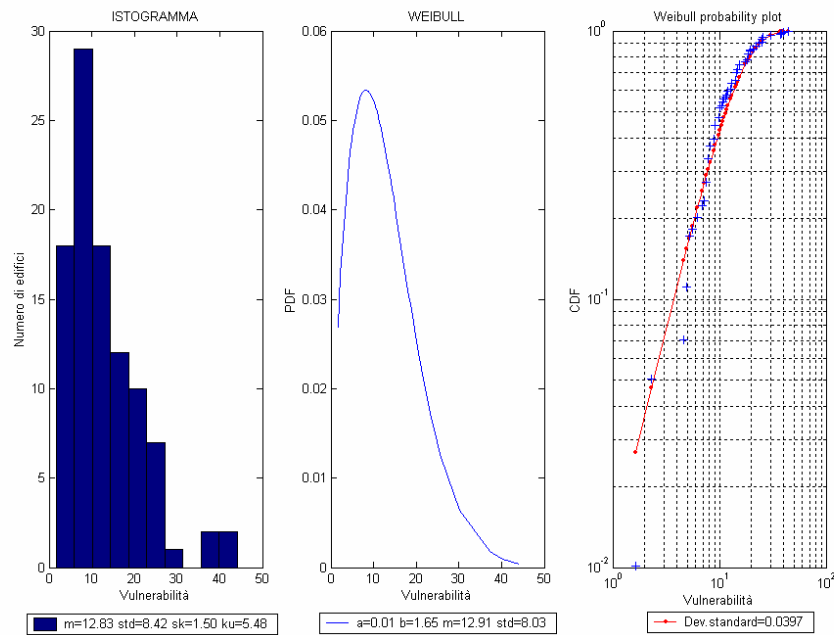
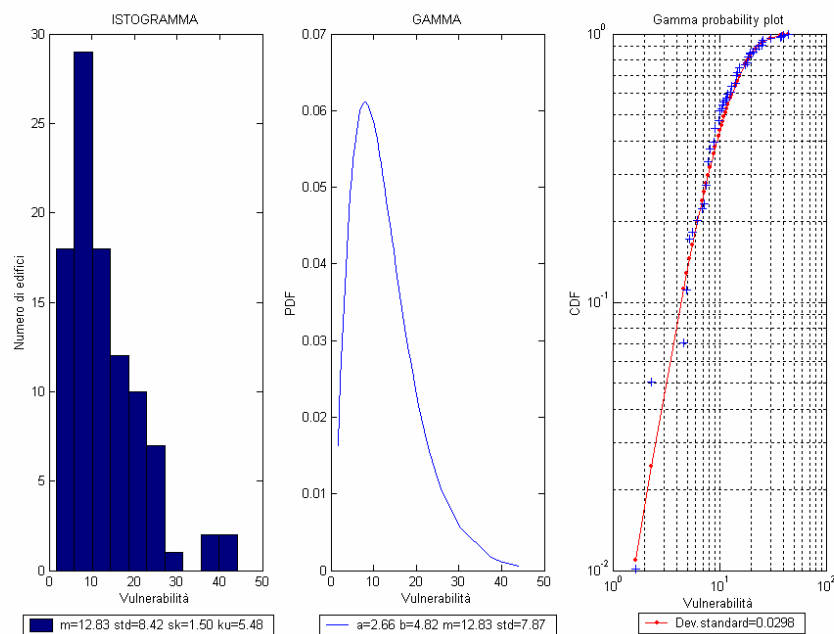


Fig.14 Edifici con 1 o 2 piani, età dal 1961 al 1971.

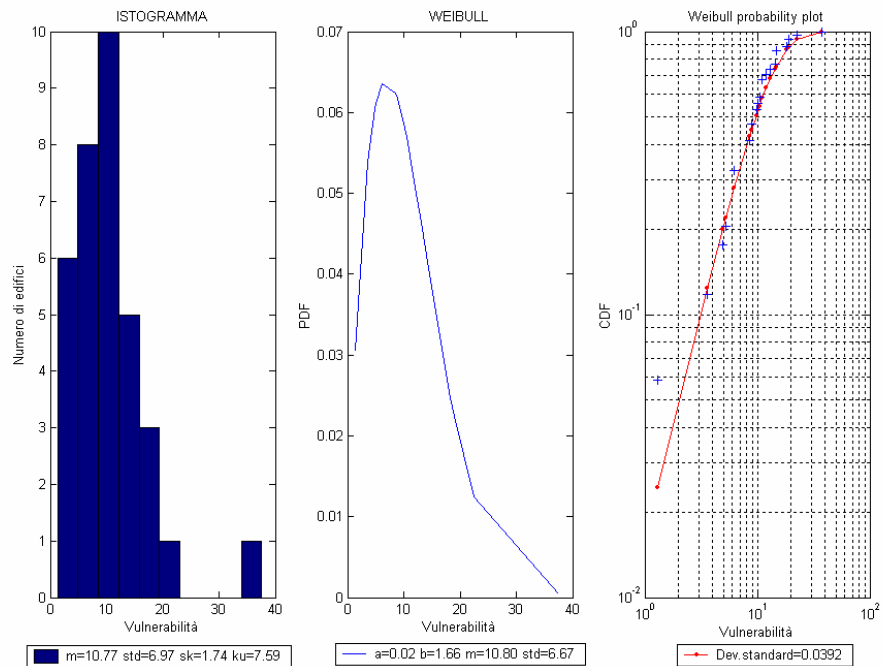
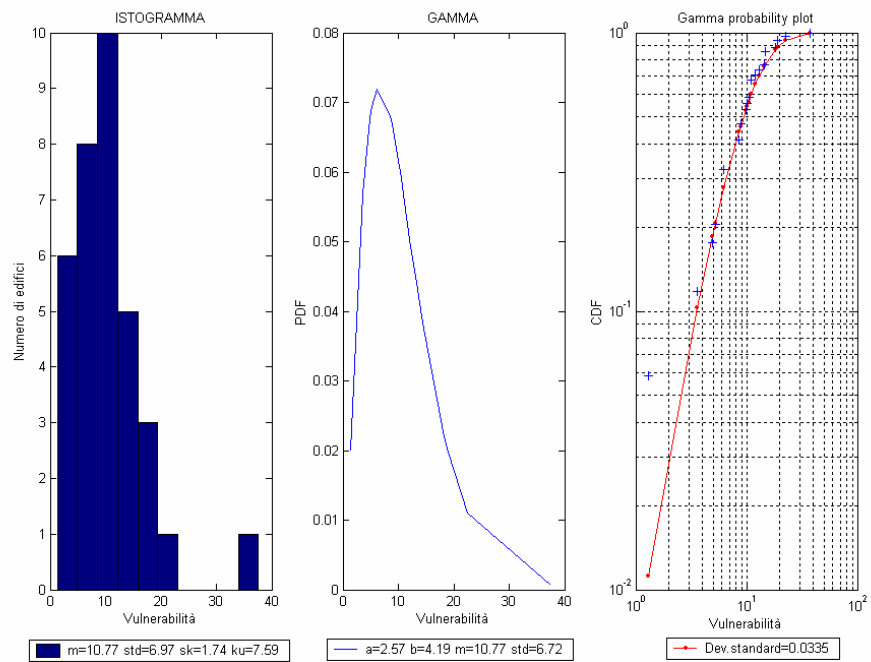


Fig.15 Edifici con 1 o 2 piani, età dal 1972 al 1981.

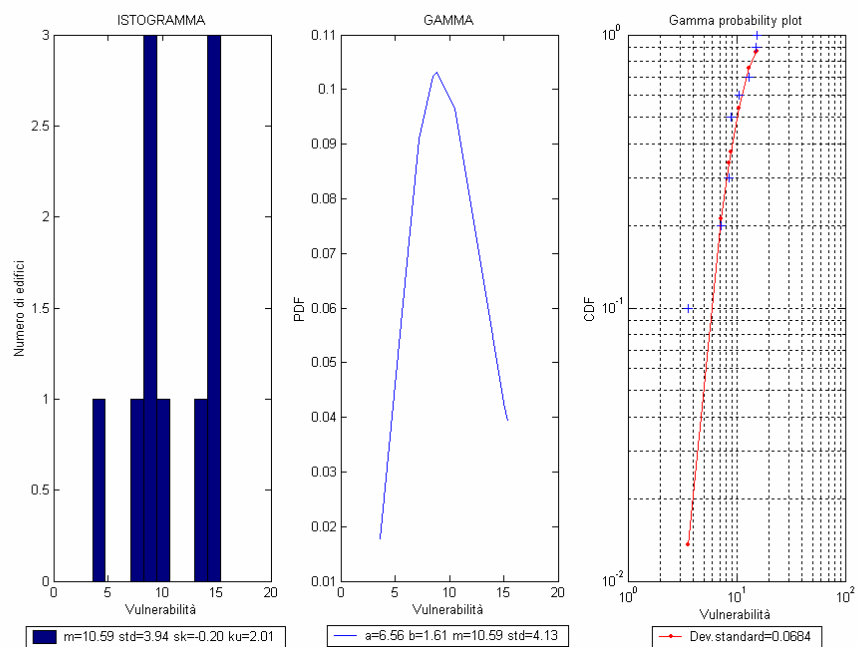
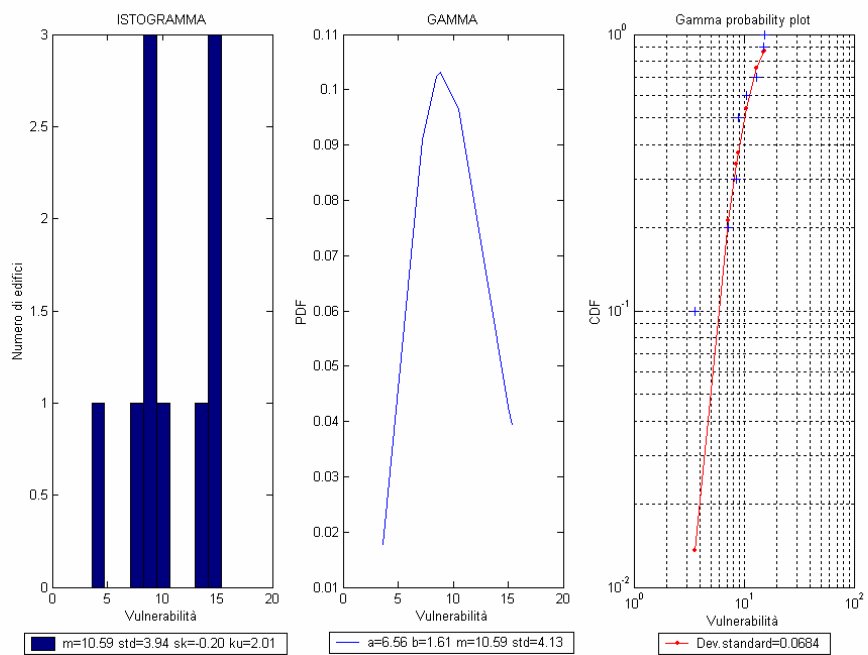


Fig.16 Edifici con 1 o 2 piani, età successiva 1981.

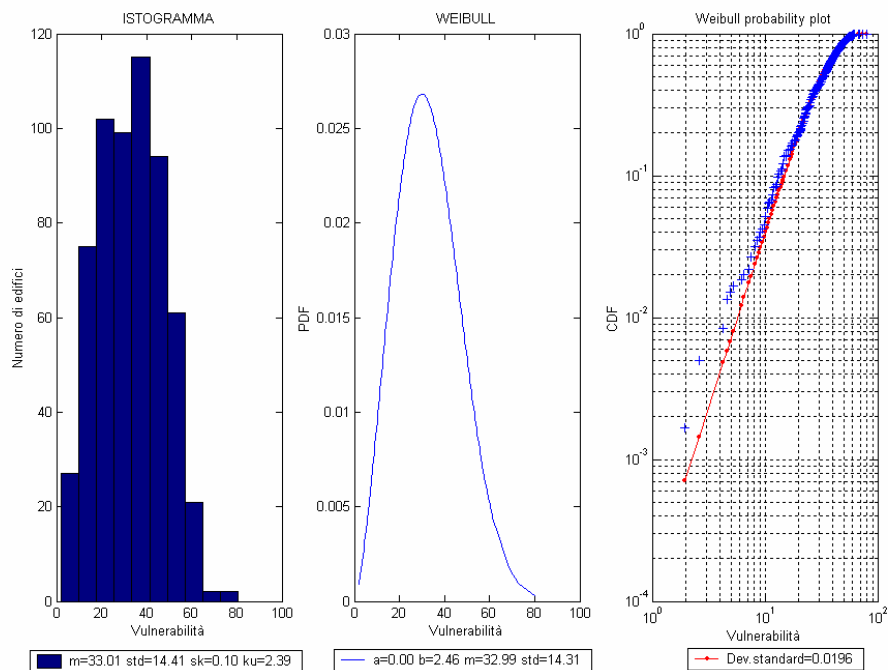
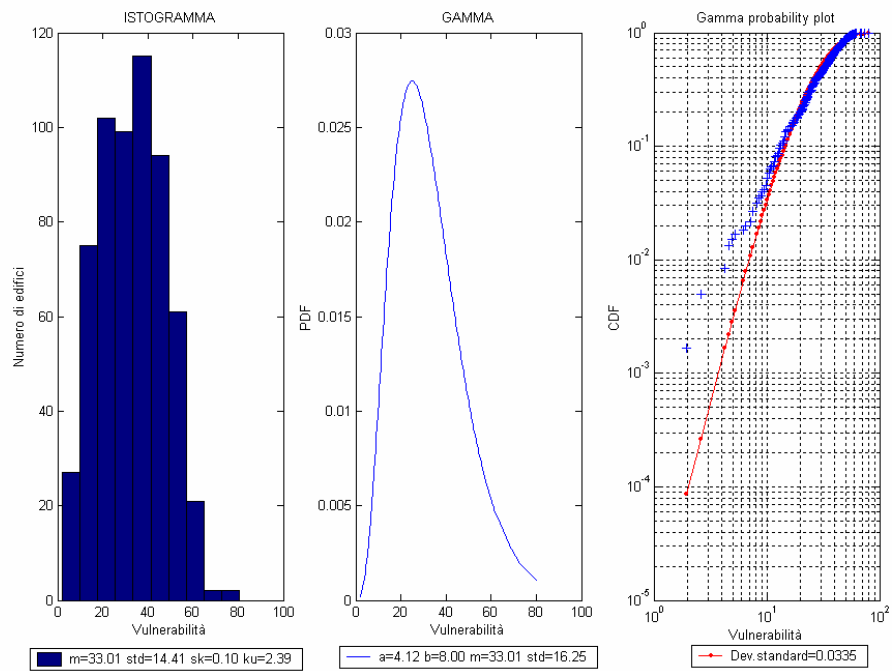


Fig.17 Edifici con 3 o più piani, età precedente al 1919.

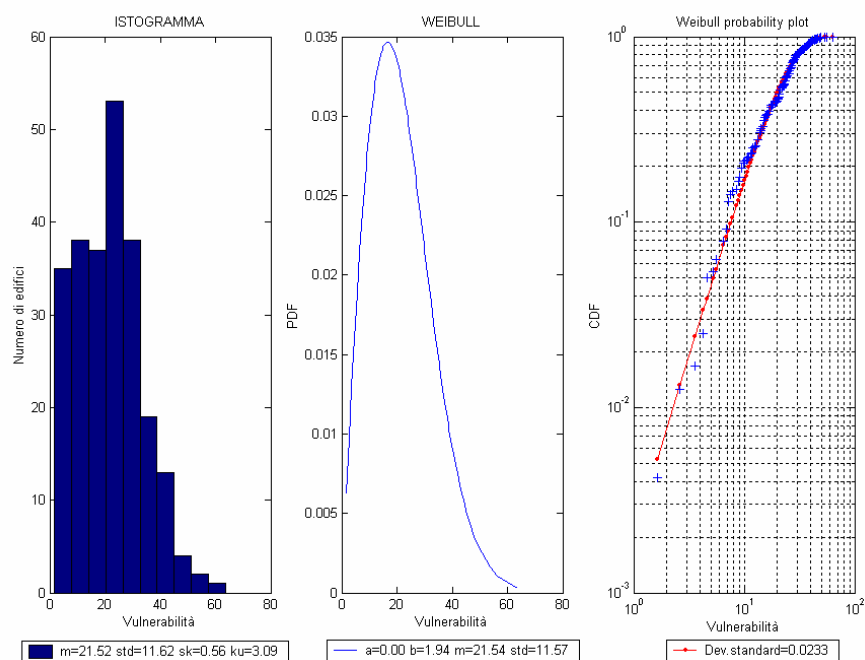
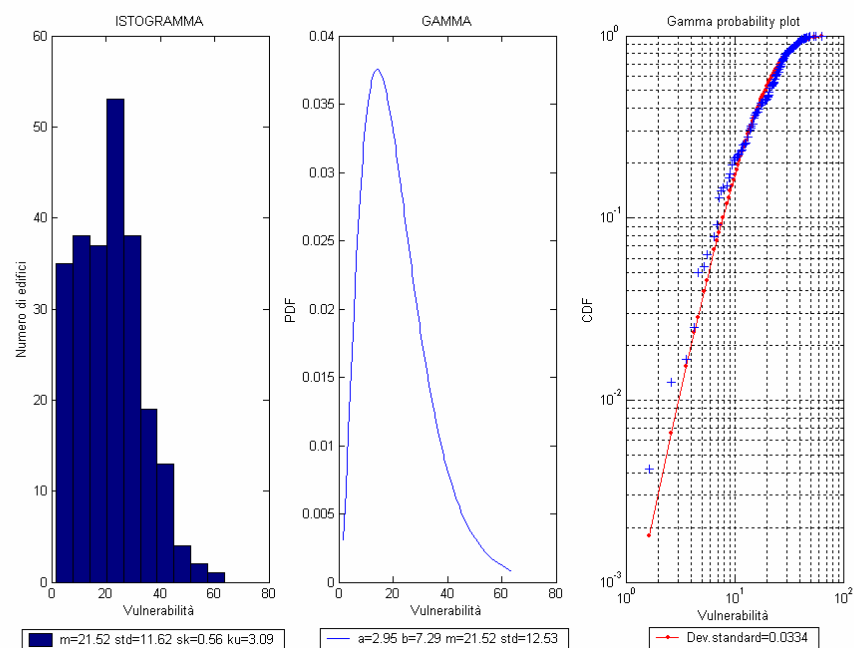


Fig.18 edifici con 3 o più piani, età dal 1919 al 1945.

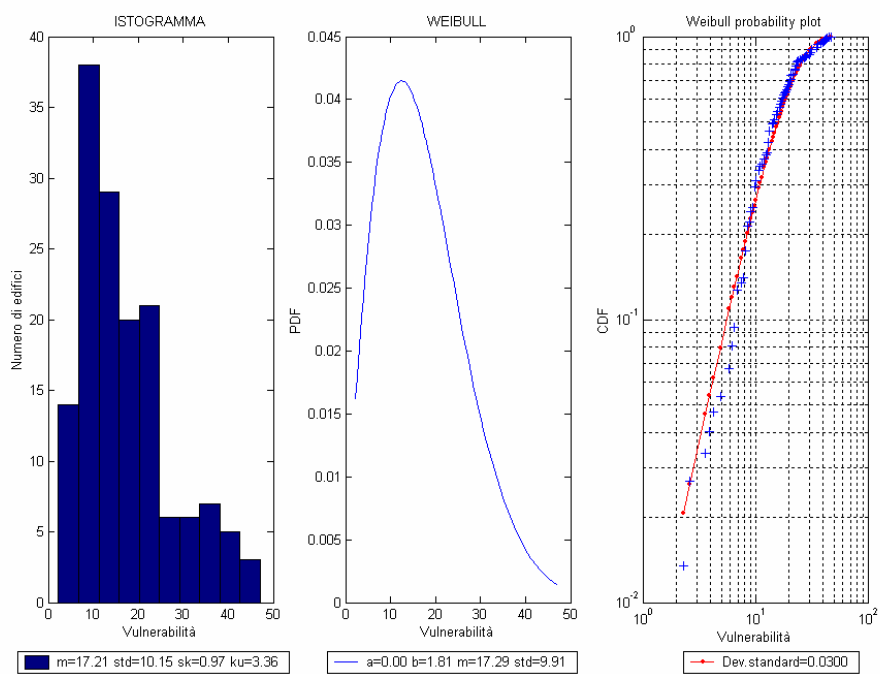
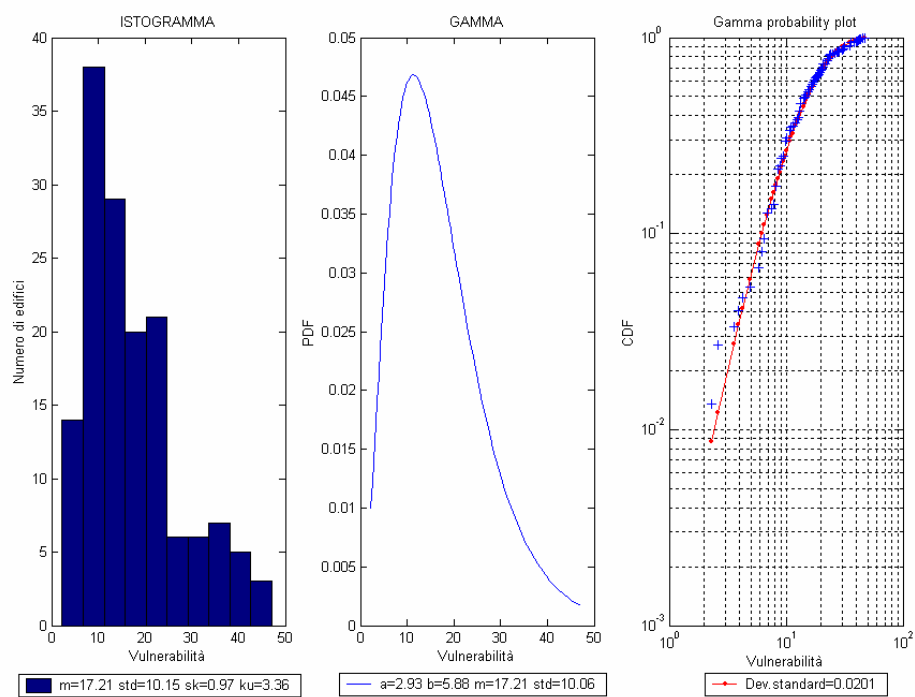


Fig.19 Edifici con 3 o più piani, età dal 1946 al 1960.

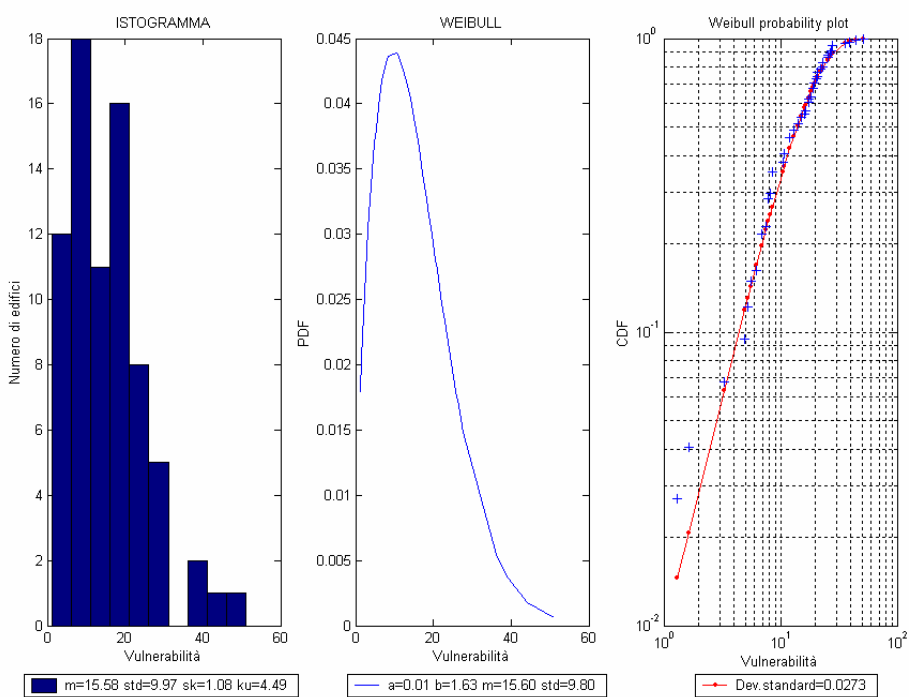
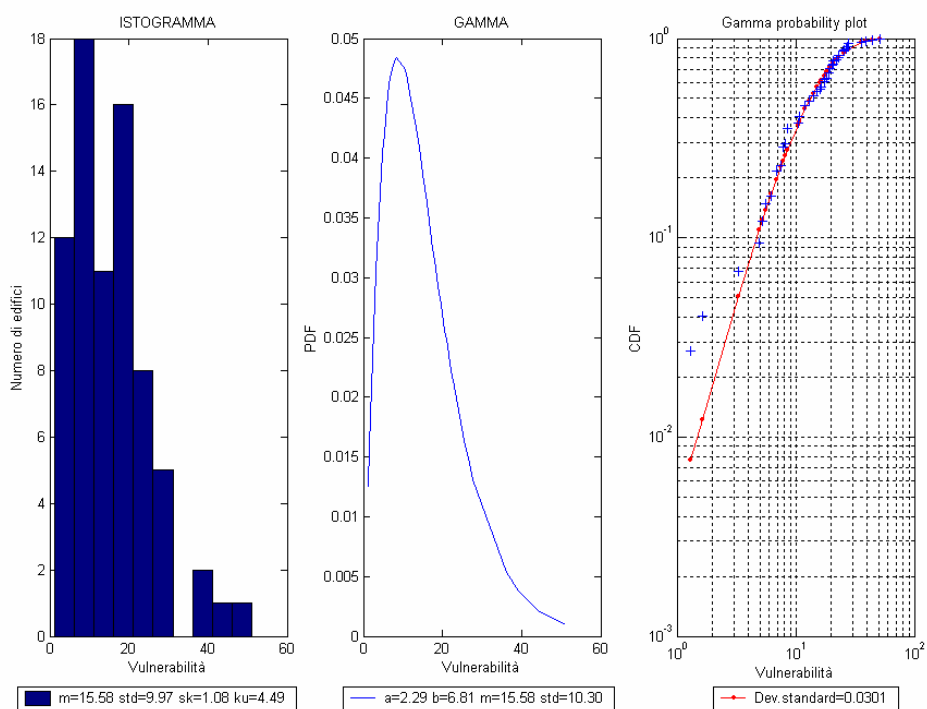


Fig.I10 Edifici con 3 o più piani, età dal 1961 al 1971.

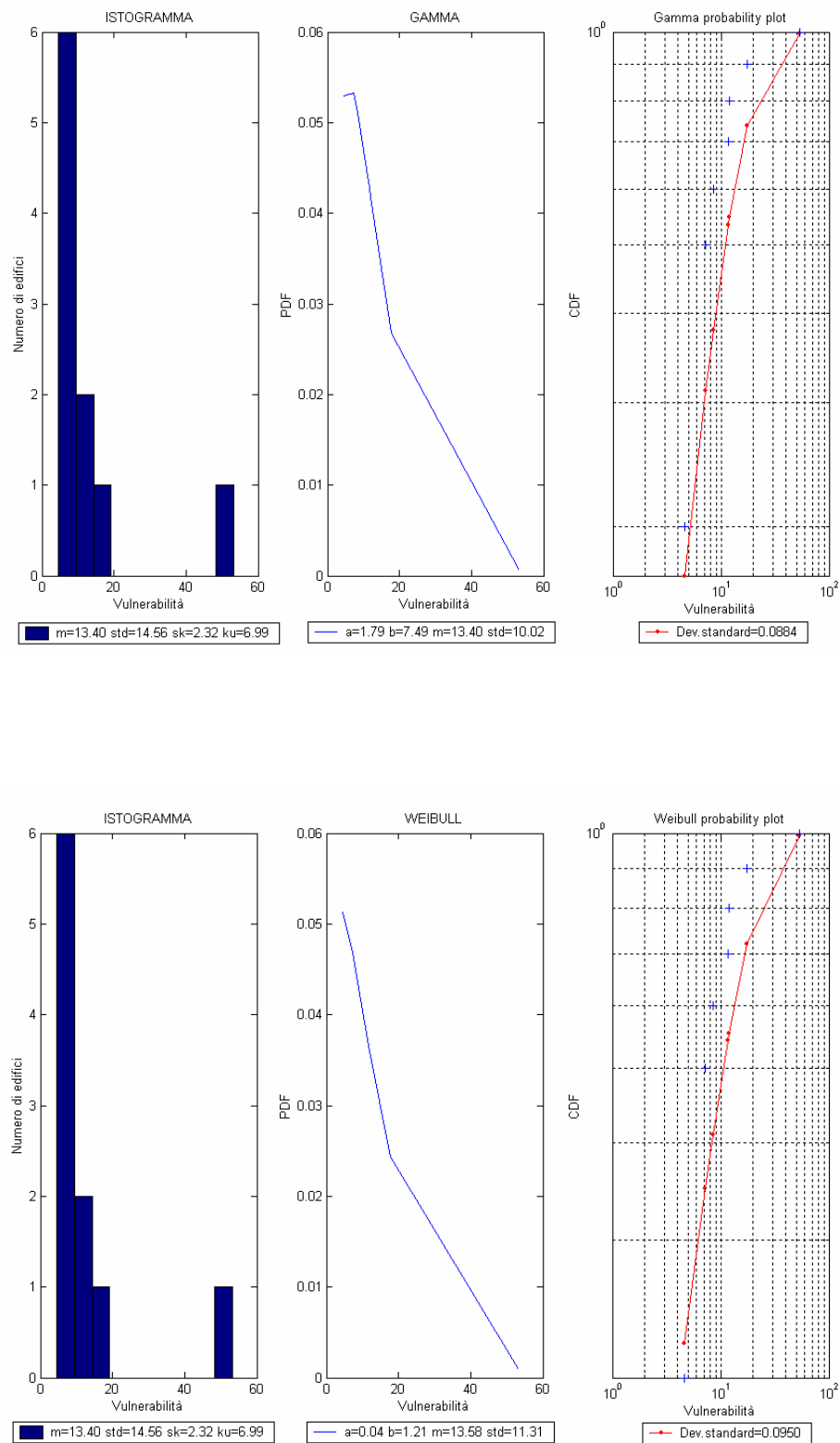


Fig.II1 Edifici con 3 o più piani, età successiva al 1972.

12 Edifici in cattivo stato di manutenzione.

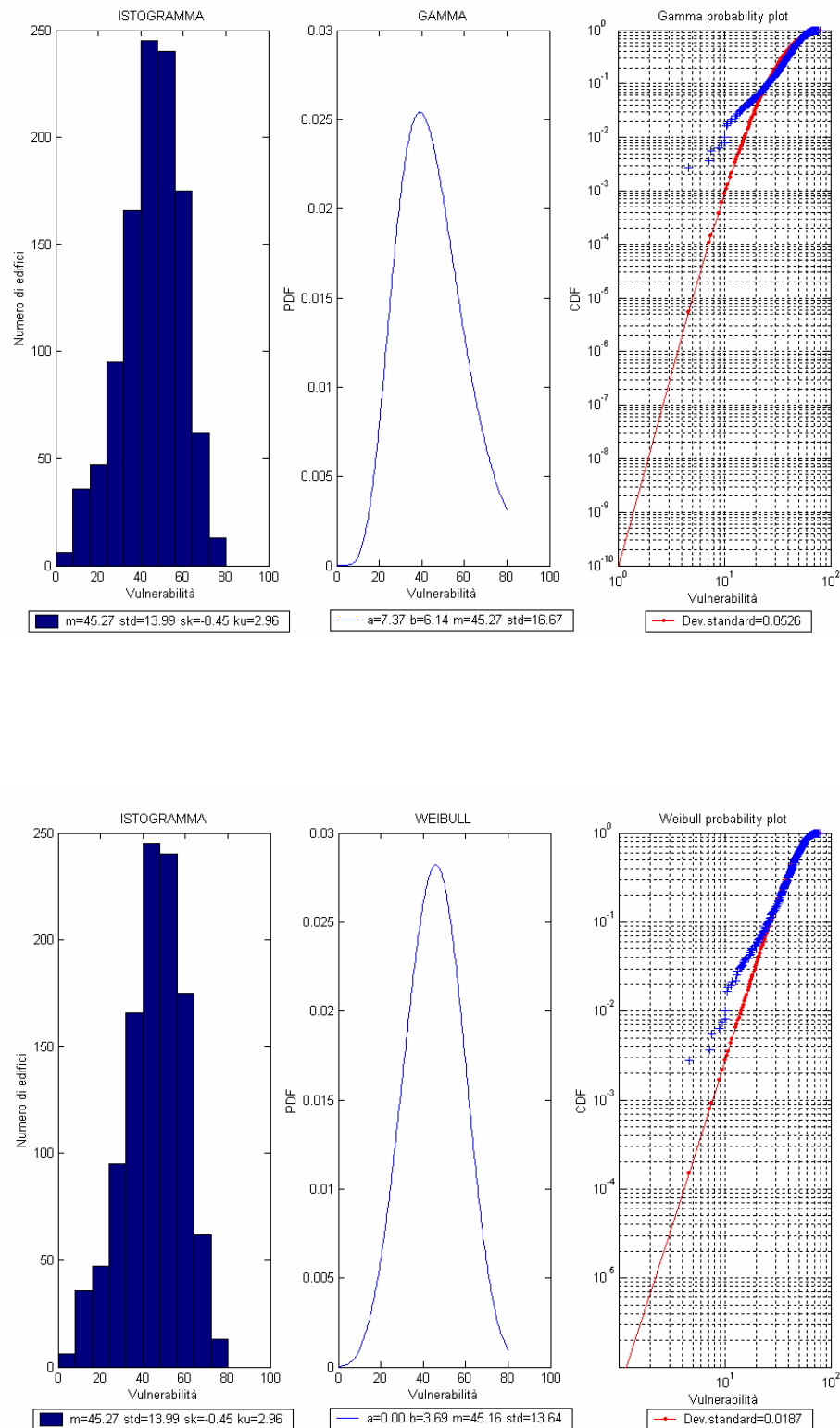


Fig.I12 Edifici con 1 o 2 piani, età precedente al 1919.

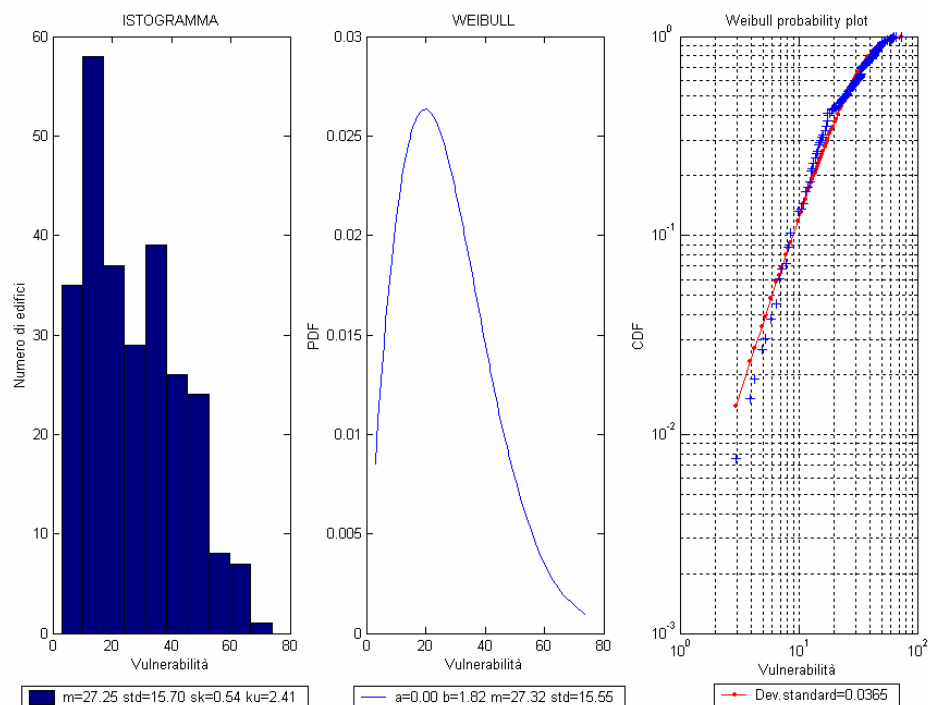
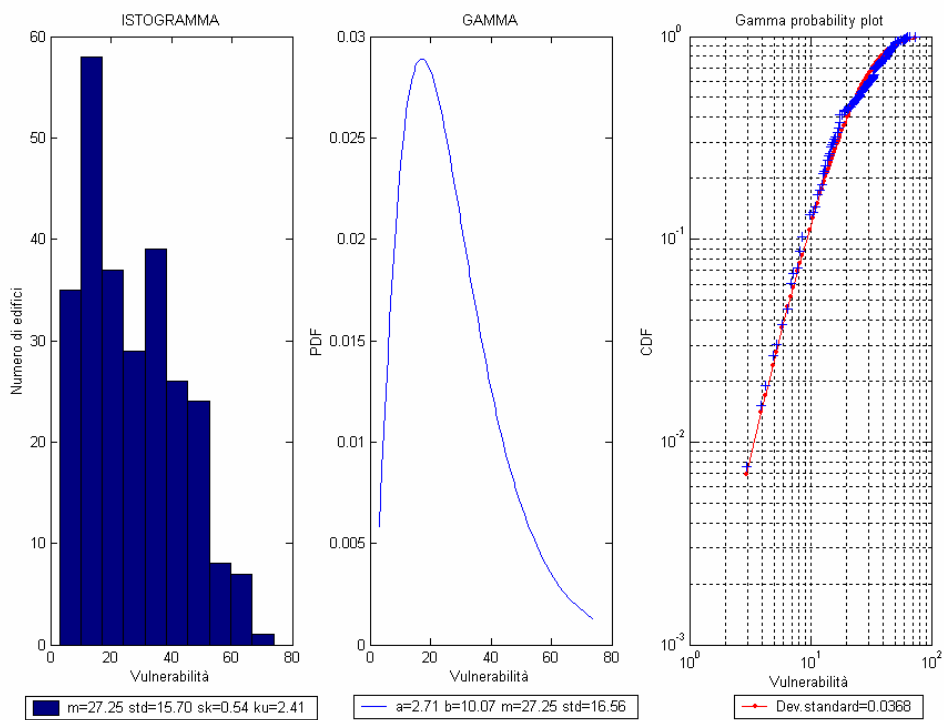


Fig.I13 Edifici con 1 o 2 piani, età dal 1919 al 1945.

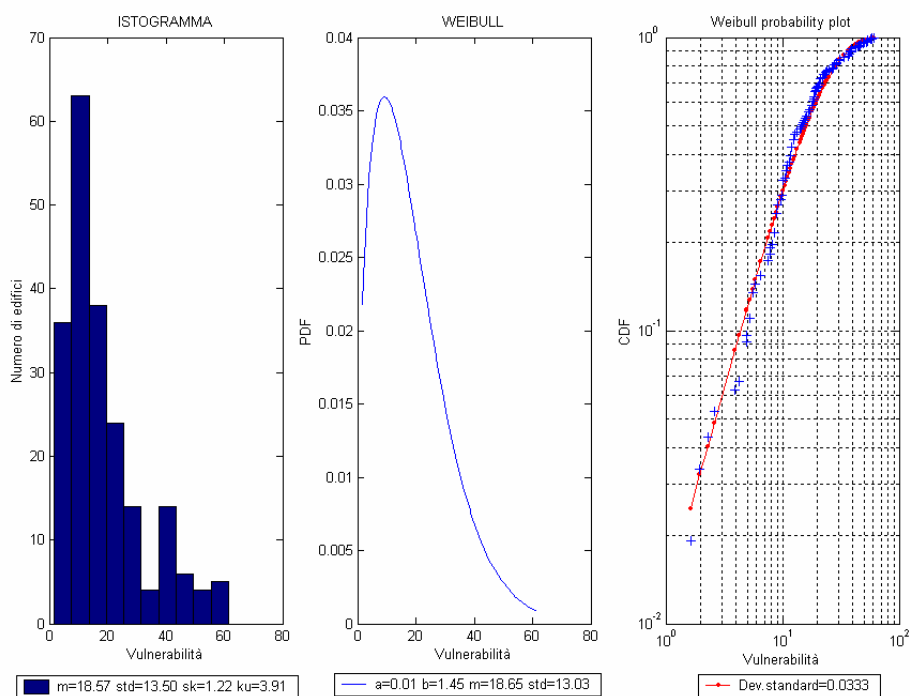
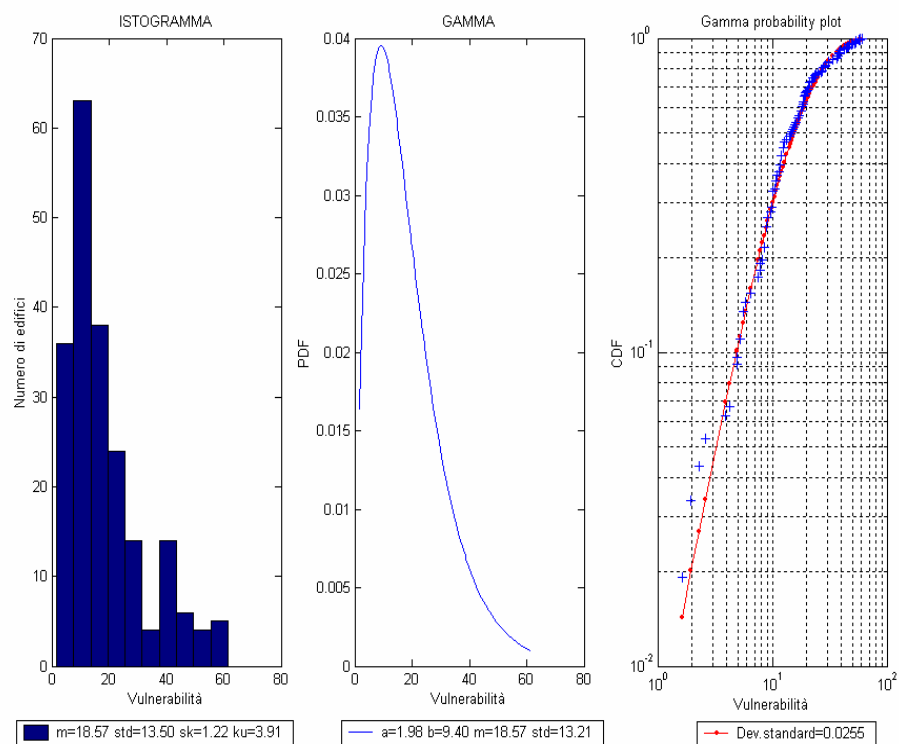


Fig.I14 Edifici con 1 o 2 piani, età dal 1946 al 1960.

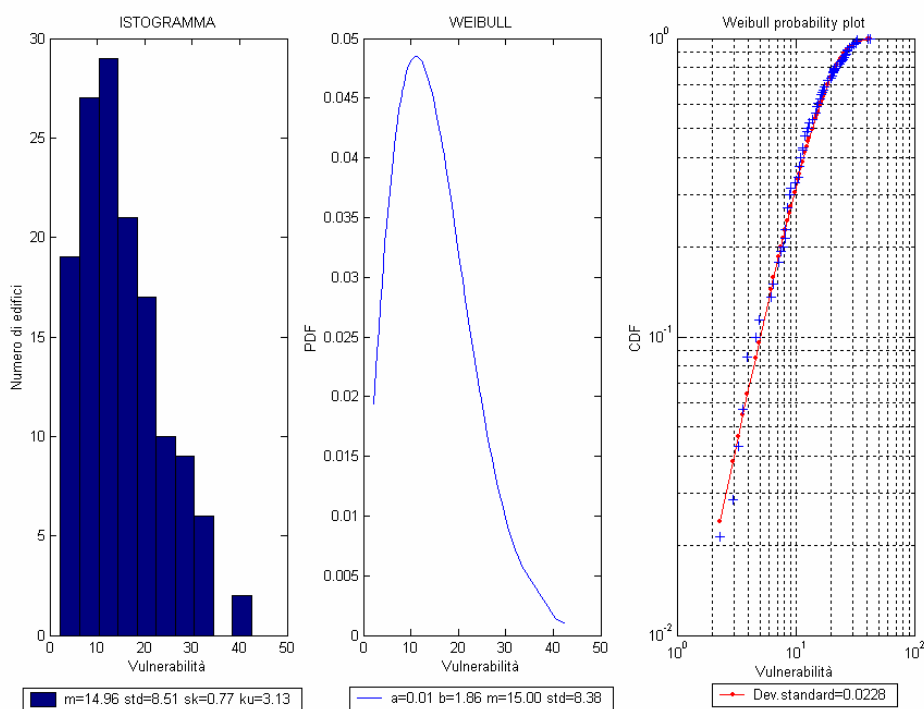
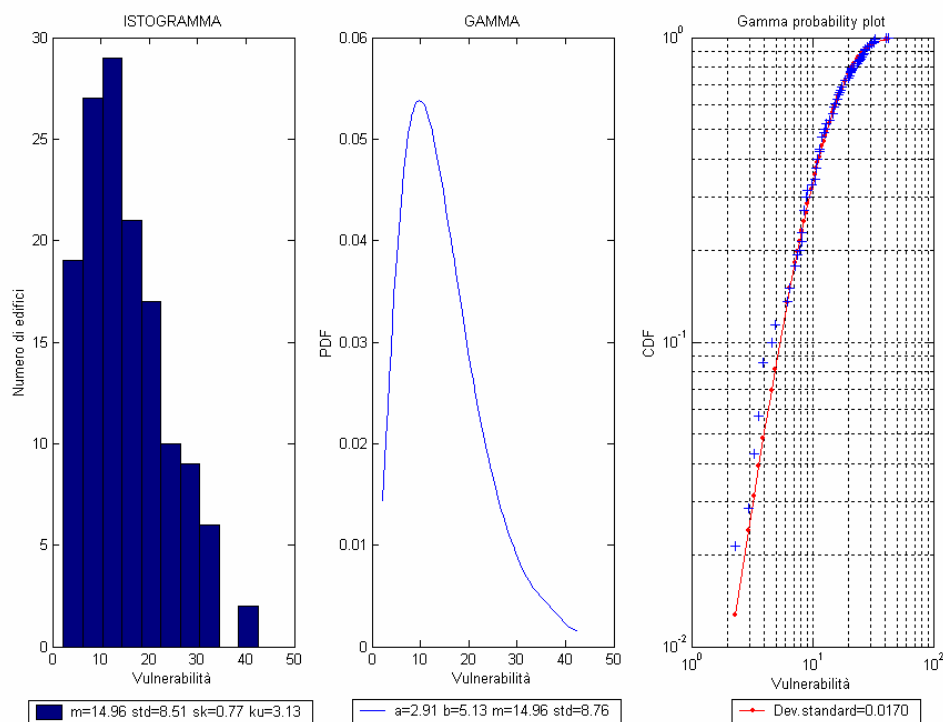


Fig.I15 Edifici con 1 o 2 piani, età dal 1961 al 1971.

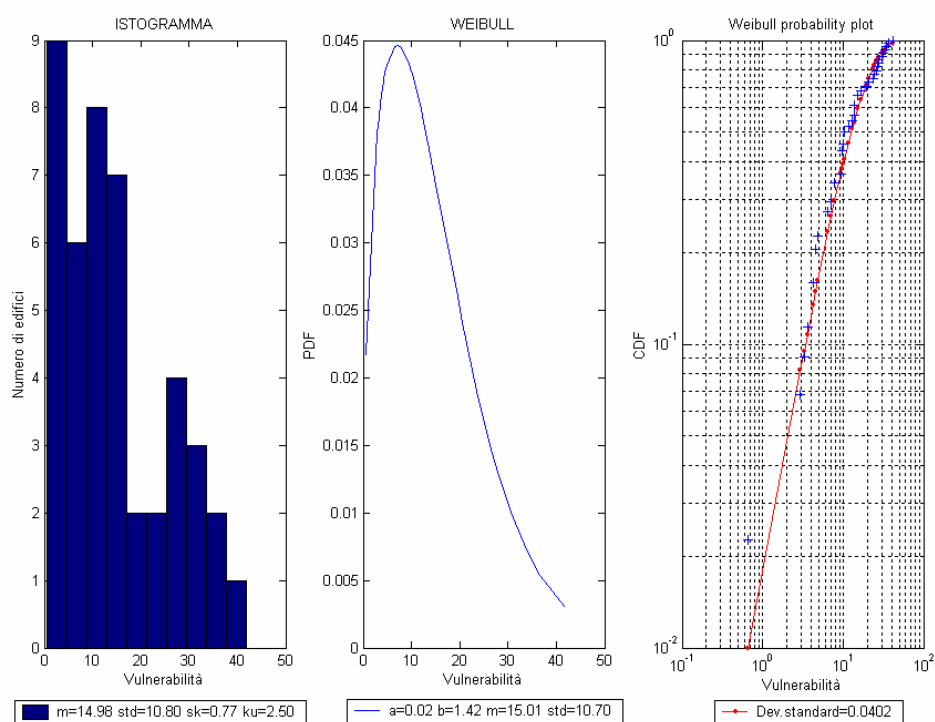
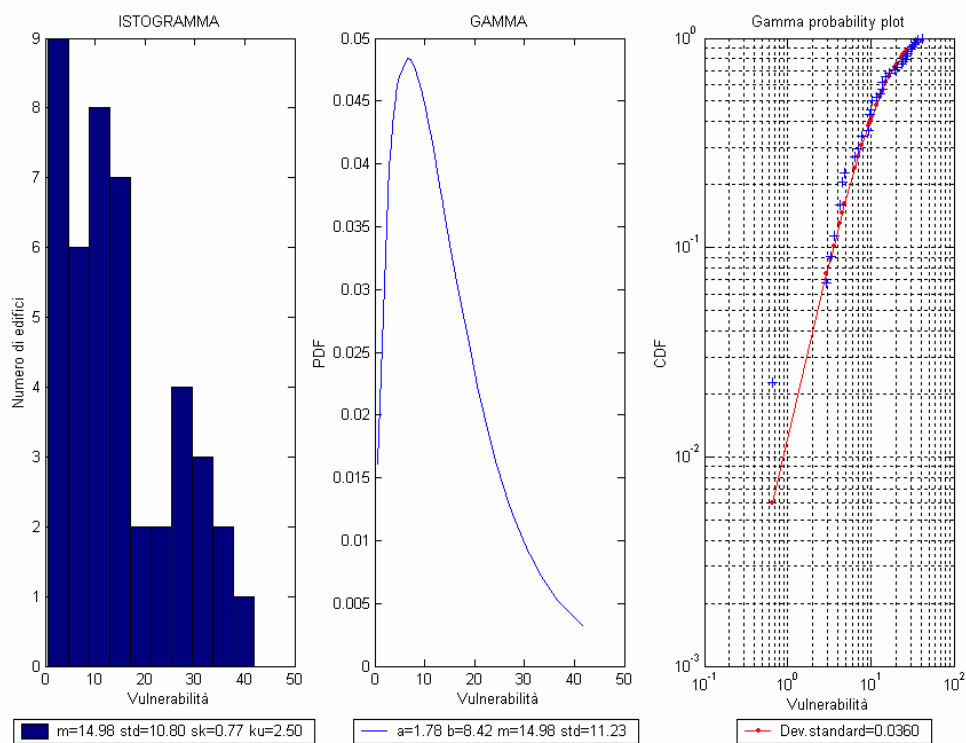


Fig.I16 Edifici con 1 o 2 piani, età dal 1972 al 1981.

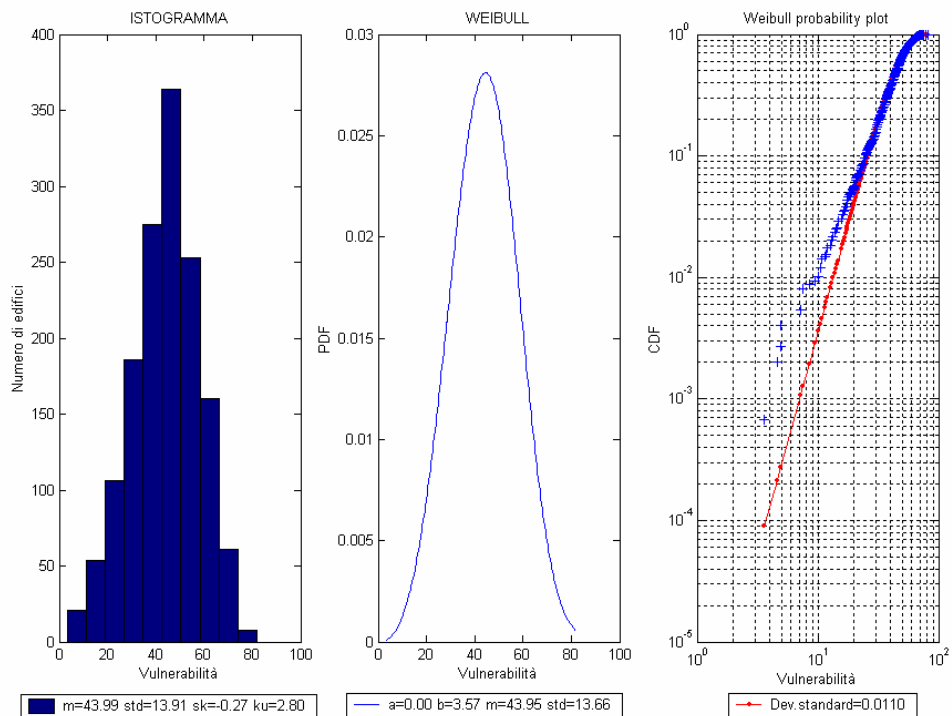
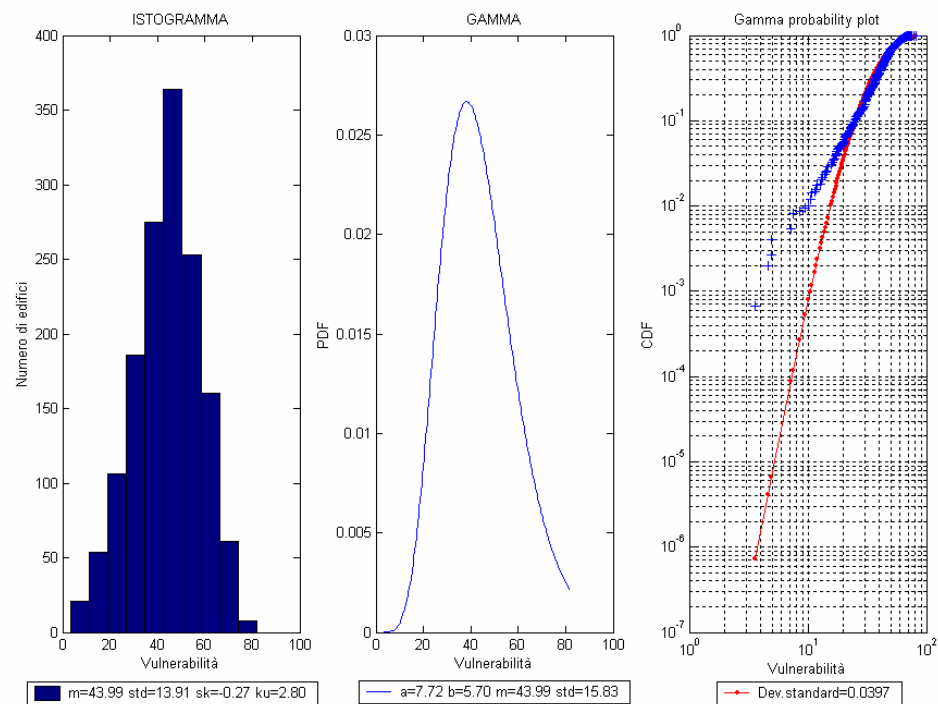


Fig.II7 Edifici con 3 o più piani, età precedente al 1919.

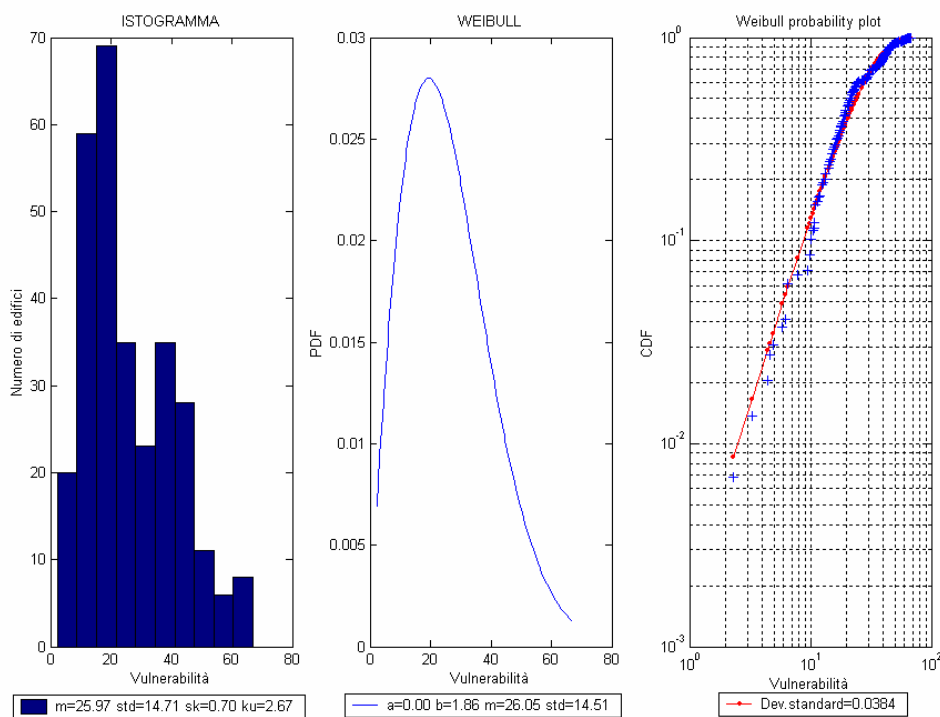
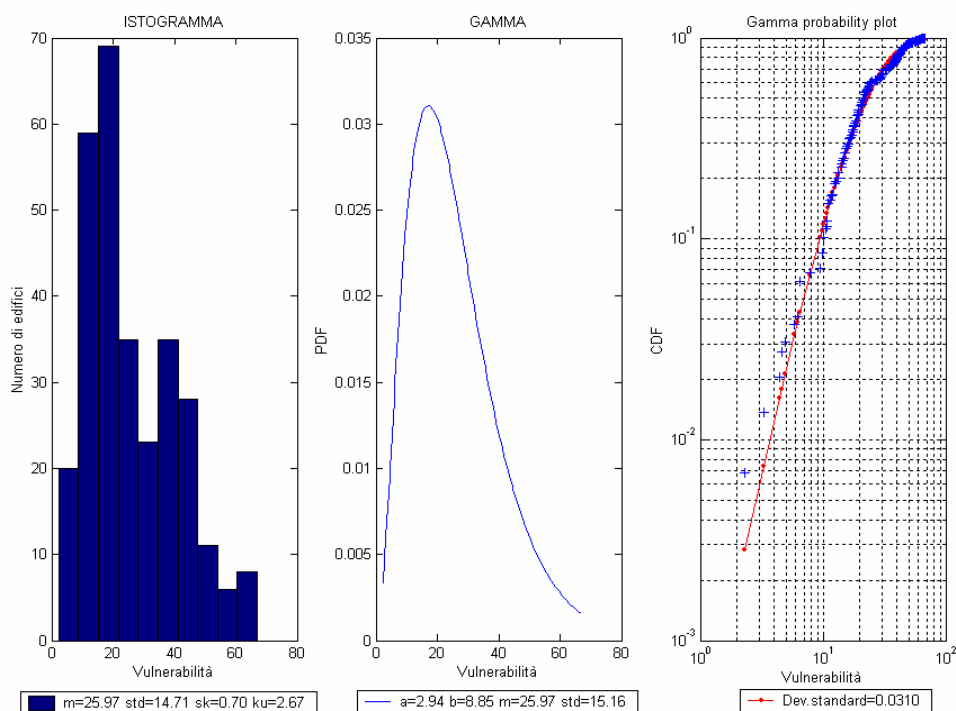


Fig.I18 Edifici con 3 o più piani, età dal 1919 al 1945.

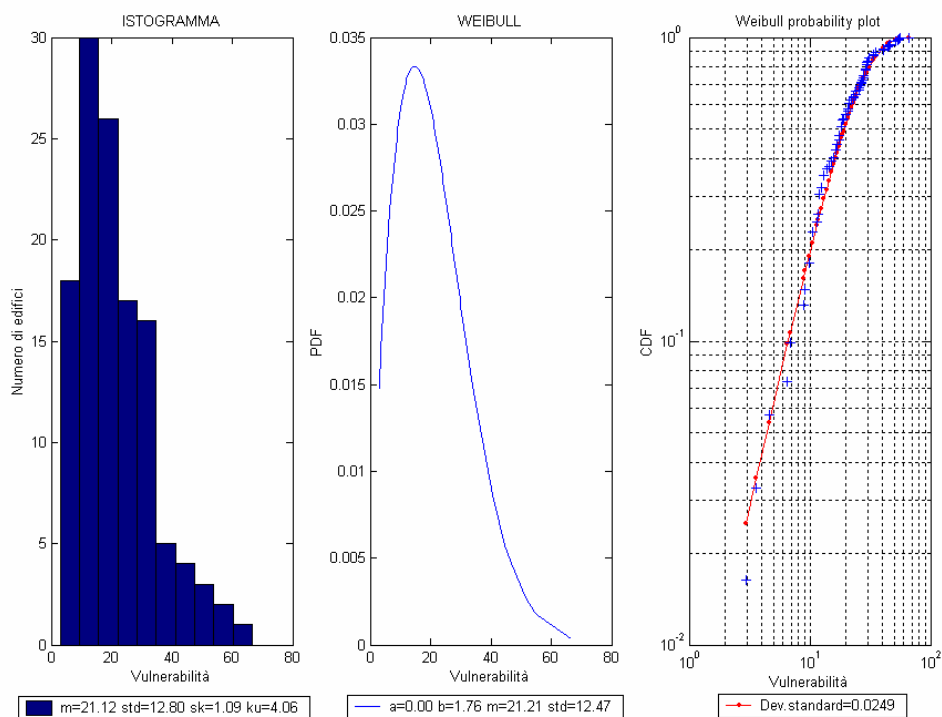
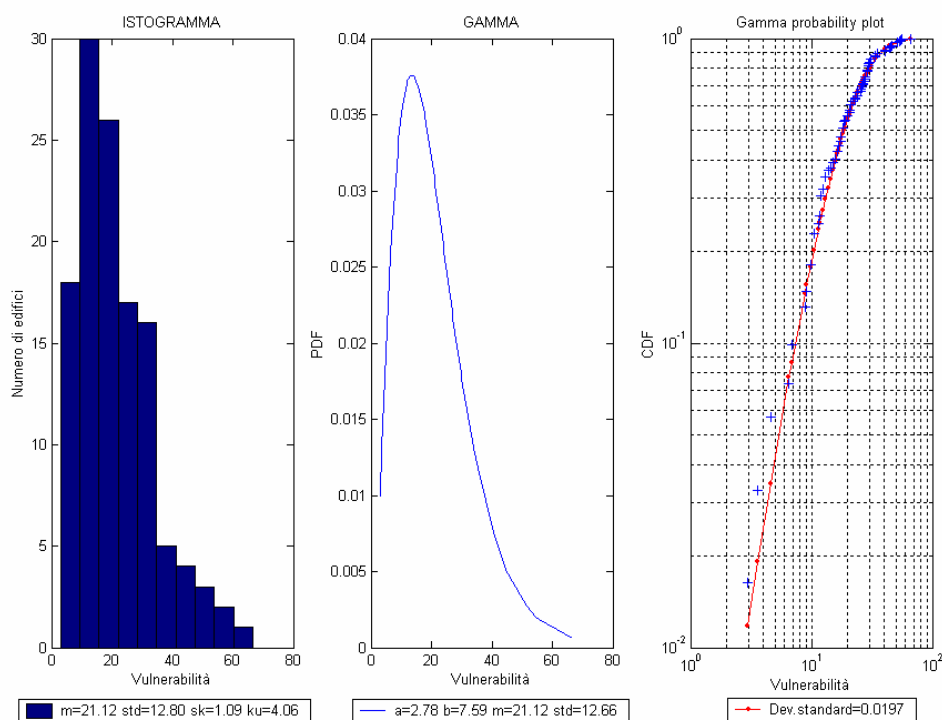


Fig.119 Edifici con 3 o più piani, età dal 1946 al 1960.

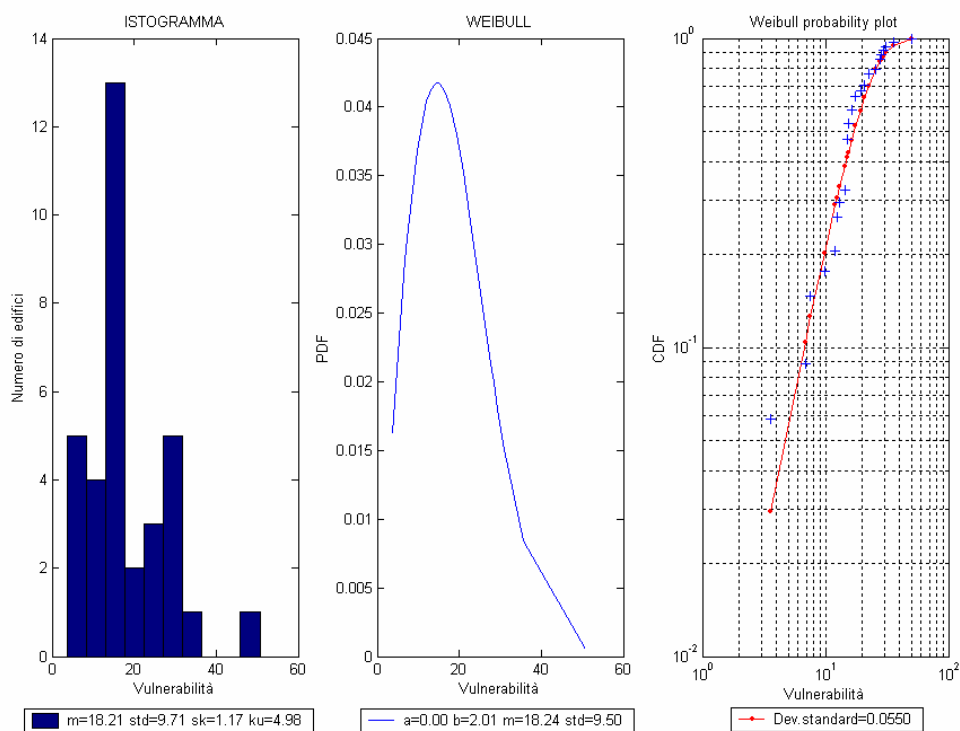
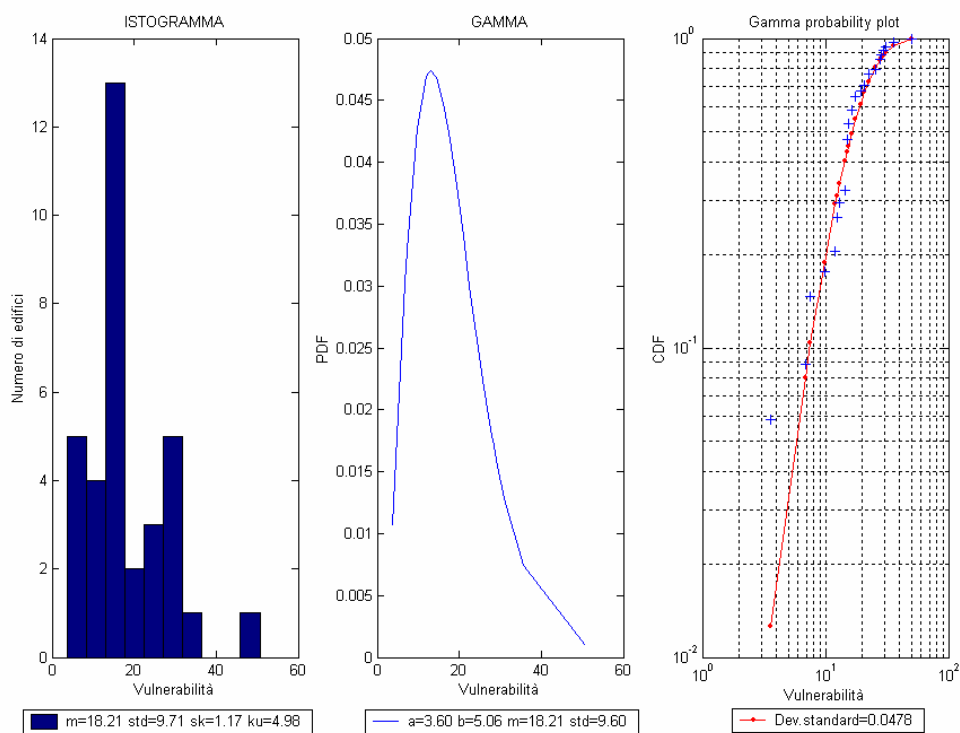


Fig.I20 Edifici con 3 o più piani, età dal 1961 al 1971.

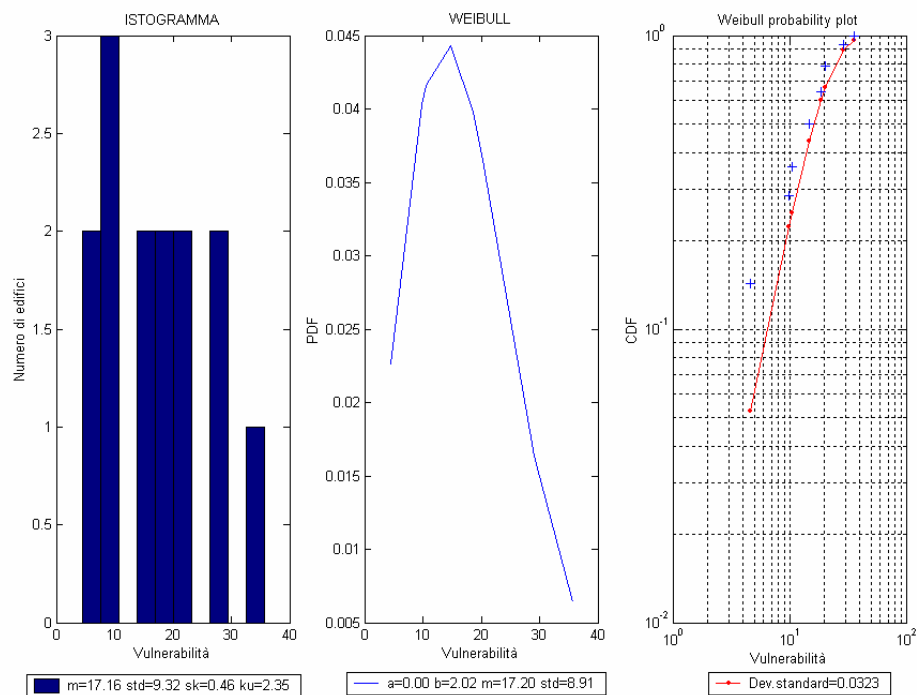
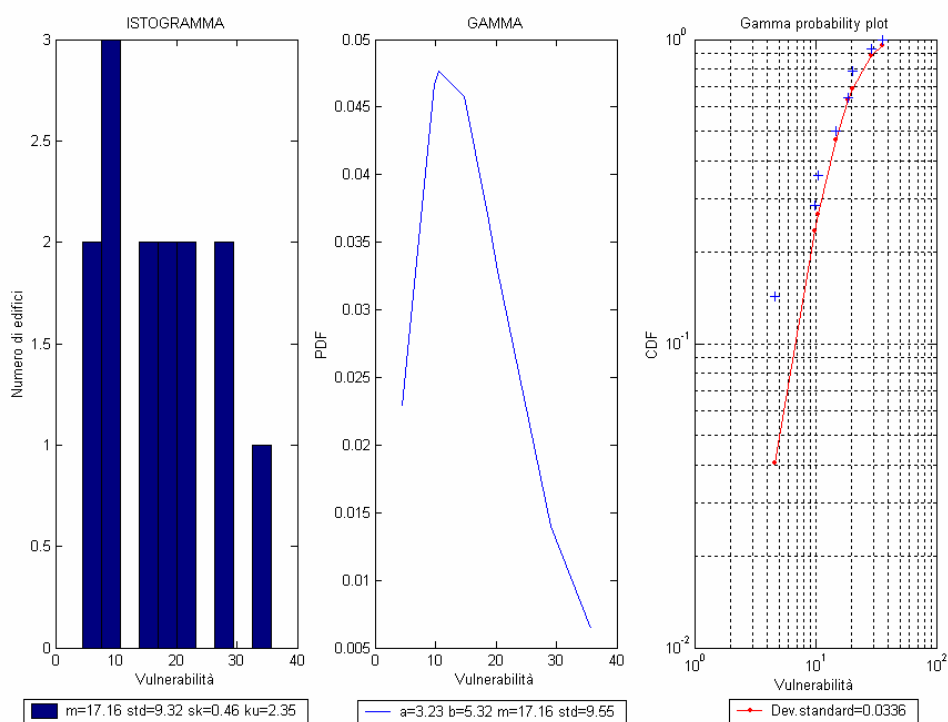


Fig.I21 Edifici con 3 o più piani, età dal 1972 al 1981.

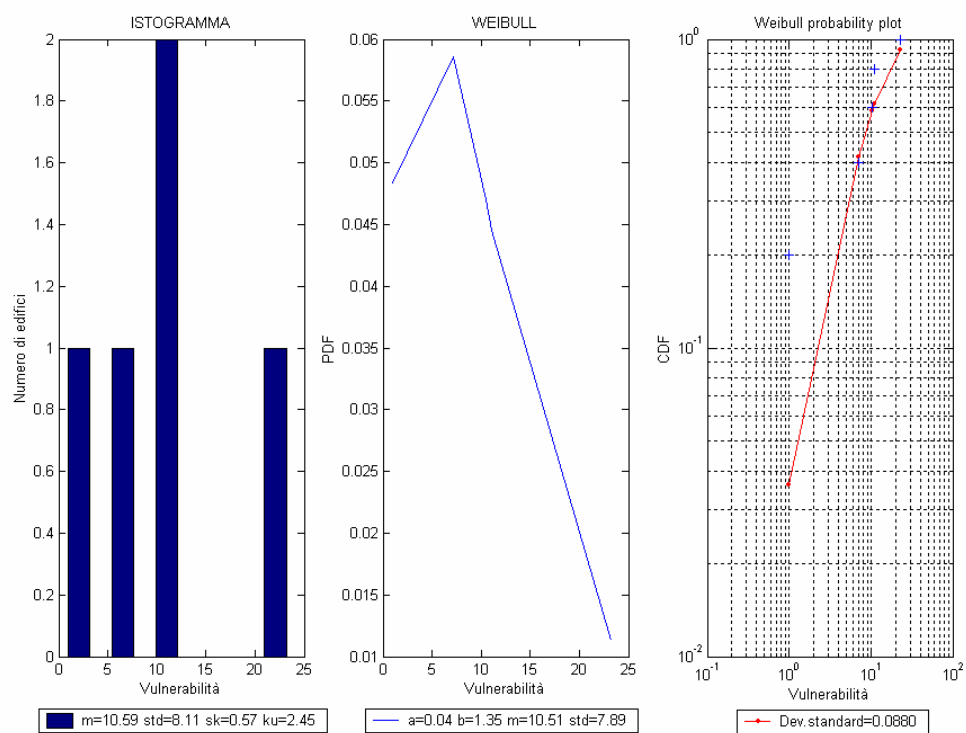
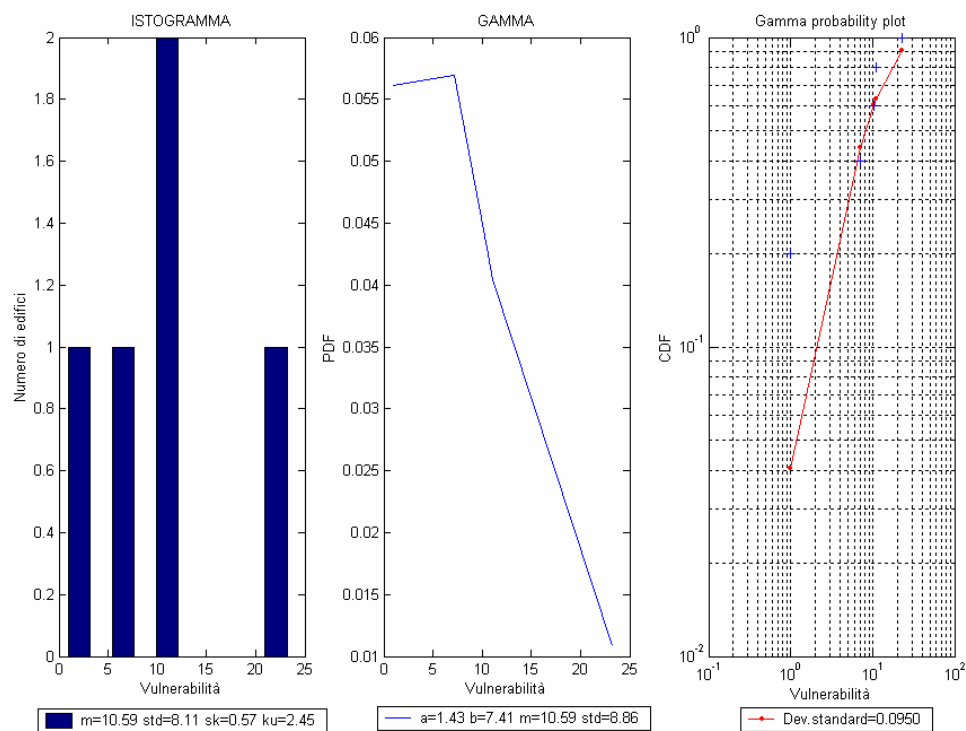


Fig.I22 Edifici con 3 o più piani, età successiva al 1981.

Bibliografia

CAPITOLO I

Società Geologica Italiana, L. Passeri, “Appennino Umbro – Marchigiano”, BE-MA editrice 1998.

C. Bisci, F. Dramis, “La geomorfologia delle Marche”, estratto da "L'Ambiente Fisico delle Marche, geologia, geomorfologia, idrogeologia", Regione Marche, Giunta Regionale, Assessorato Urbanistica Ambiente.

E. Centamore, G. Deiana, “La geologia delle Marche, numero speciale in occasione del 73° Congresso della società Geologica Italiana, Roma 30 settembre – 4 ottobre 1986”

CAPITOLO II

F. Calamita, M. Coltorti, P.P. Pierantoni, A. Pizzi, V. Scisciani, E. Turco, "Relazioni tra le faglie quaternarie e la sismicità nella dorsale appenninica umbro - marchigiana: l'area di Colfiorito", CNR, Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, “Convegno 1998: Collezione di articoli pubblicati su riviste italiane e straniere, relativi al terremoto dell'Umbria – Marche del settembre 1997”, Roma 19 – 21 ottobre 1998.

P.Galli, V. Bosi, F. Galadini, M. Meghraoui, P. Messina, R. Basili, M. Moro, A. Sposato, "Fratturazione superficiale connessa ai terremoti umbro - marchigiani del settembre ottobre 1997", Italian Journal of Quaternary Sciences, 10 (2), pp. 255 - 262, 1997.

P.Galli, V. Bosi, F. Galadini, M. Meghraoui, P. Messina, R. Basili, M. Moro, A. Sposato, "Evidenze tettoniche di superficie connesse ai terremoti umbro - marchigiani del settembre - ottobre 1997", Ingegneria Sismica, Anno XV, N° 1, pp. 15 - 21, gennaio - aprile 1998.

CNR - Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, “Convegno 1998: Note relative al terremoto dell'Umbria – Marche del settembre 1997” Roma 19 – 21 ottobre 1998, pp. 1 - 10.

E. Esposito, S. Porfido, A.L. Simonelli, G. Iaccarino, G. Mastrolorenzo, "Effetti primari e secondari indotti dalla sequenza sismica umbro - marchigiana del 1997", CNR, Convegno Nazionale del GNDT, Roma, 19 - 21 ottobre 1998.

F. Capotorti, G. Monachesi, M. Mucciarelli, T. Sanò, L. Troiani, “Danneggiamenti ed effetti di sito nel terremoto umbro – marchigiano del settembre 1997”, Ingegneria sismica, Anno XIV, n°3, pp. 12 - 21, 1997, Pàtron editore.

E. Boschi, M. Cocco, “Studi preliminari sulla sequenza sismica dell'Appennino Umbro – Marchigiano del settembre – ottobre 1997”, Istituto Nazionale di Geofisica.

F. Cinti, L. Cucci, F. Marra, P. Montone, “Le deformazioni superficiali associate alla sequenza sismica umbro – marchigiana: studio preliminare” Istituto Nazionale di Geofisica

C. Gasparini, M. Anzidei, S. Conte, S. Del Mese, V. De Rubeis, A. Maramai, A. Massicci, F. Riguzzi, A. Tertulliani, P. Tosi, C. Vannucci, M. Vecchi, “Indagine macrosismica per la sequenza sismica umbro – marchigiana settembre – ottobre 1997”, Istituto Nazionale di Geofisica.

E. Boschi, E. Guidoboni, G. Ferrari, G. Valensise, "I terremoti dell'Appennino Umbro – Marchigiano, area sud orientale dal 99 a.c. al 1984", Istituto Nazionale di geofisica, SGA Storia Geofisica Ambiente, Editrice Compositori

CAPITOLO III

Burrough PA. "Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment". Claredon Press, Oxford, 1996.

ILWIS 2.2. User's Manual. ITC, The Netherlands, 1998

Arc/Info User's Manual, ESRI 1990

Understanding GIS, the Arc/Info method, Environmental System Research Institute, 1990.
National Research Council, "Landslides: Investigation and Mitigation; special report 247", A.A.V.V., A.K. Turner, R.L. Schuster Editors, 1996.

CAPITOLO IV

M. Carro, "Valutazione degli effetti di superficie indotti dal terremoto Umbria - Marche del 26/9/1997 e analisi di metodi per la determinazione della struttura dei versanti, attraverso l'utilizzo dei Sistemi Informativi Territoriali", Tesi di Laurea, Scienze Ambientali, A.A. 1999 - 2000.

CAPITOLO V

U.S. Geological Survey, "Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region – An Earth – Science perspective", R.C. Wilson and D.K. Keefer, "Predicting areal limits of earthquake – induced landsliding", United States Government Printing Office, Washington, 1985, pp. 317 -343.

E.L. Harp, R. C. Wilson, D.K. Keefer, G.F. Wieczorek, "Seismically induced landslides: current research by the U.S. Geological Survey".

A. Hansen, C.A. M. Franks, "Characterisation and mapping of earthquake triggered landslides for seismic zonation", Fourth International Conference on Seismic Zonation, Stanford California, 1991, Vol. I, pp. 149 - 195.

E.L. Harp, R.C. Wilson, "Shaking Intensity Threshold for Rock Falls and Slides: Evidence from 1987 Whittier Narrows and Superstition Hills Earthquake Strong motion Record", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.85, No. 6, pp. 1739-1757, December 1995.

R.W. Jibson, E.L. Harp, J.A. Michael, "A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps: An Example from the Los Angeles, California, Area" USGS, 1998.

N. Sitar, A.M. ASCE, G. Wayne Clough, M. ASCE, "Seismic Response of Steep Slopes in

Cemented Soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 2, pp. 210 - 227, February, 1983.

M. Govi, P.F. Sorzana, “Effetti geologici del terremoto” in “Studio geologico dell’area maggiormente colpita dal terremoto friulano del 1976”, Progetto Finalizzato Geodinamica, *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, Vol. 83, No. 2, pp. 329-368, 1977, B. Martini edit.

M. Barluzzi, P. Conversini, “Frane di crollo lungo un tratto della valle del fiume Corno, Umbria orientale: verifiche della stabilità, traiettorie e limiti di espansione dei blocchi lapidei”, *Geologia Tecnica e Ambientale*, No. 3, pp. 67-75, 1996.

CAPITOLO VI

Steven L. Kramer, "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall ed., 1996.

F. Sabetta, A. Pugliese, “Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong – motion records”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, No. 5, pp. 1491-1513, October 1987.

F. Sabetta, A. Pugliese, “Estimation of Response Spectra and simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 2, pp. 337-352, April 1996.

A. Tenta, L. Franceschina, A. Marcellini, “Expected ground motion evaluation for Italian sites”, 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, 1992, pp. 1 - 6.

P. Spudich, J.B. Fletcher, M. Hellweg, J. Boatwright, C. Sullivan, W.B. Joyner, T.C. Hanks, D.M. Boore, A. McGarr, L.M. Baker, A.G. Lindh, “SEA96 – A New Predictive Relation for Earthquake Ground Motions in Extensional Tectonic Regimes”, *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 190-198, January/February 1997.

P. Spudich, W.B. Joyner, A.G. Lindh, D.M. Boore, B.M. Margaris, J.B. Fletcher, “SEA99: A revised Ground Motion Prediction Relation for Use in Extensional Tectonic Regimes”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 89, No. 5, pp. 1156-1170, October 1999.

N.A. Abrahamson, W.J. Silva, “Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes”, *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 94-127, January/February 1997.

N.A. Abrahamson, K.M. Shedlock, “Overview”, *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 9-23, January/February 1997.

V. Pessina, “Il progetto Catania del GNDT/CNR (1996-1999): scenari sismici per l’area ad alto rischio sismico. Carte di scuotimento sismico di scenario”, *International Centre for Mechanical Science*, Lucca, 15-17 Novembre 2000, pp. 1 - 11.

CAPITOLO VII

L. Luzi, P. Napoletano, A.G. Fabbri, "Geographical Information Systems for Predictive Modelling and Spatial Data Integration in Landslide Hazard Zoning", ITC, Enschede, The Netherlands, 1996.

Peter A. Burrough, Rachael A. McDonnell, "Principles of Geographical Information System", Oxford University Press, 1998.

CAPITOLO VIII

ISTAT 1991, "13° censimento generale della popolazione, 1991. Dati sulle caratteristiche strutturali della popolazione e delle abitazioni". Roma

F.Meroni, V.Petrini, G.Zonno, "Valutazione della vulnerabilità di edifici su aree estese tramite dati ISTAT", ANIDIS, Atti del 9° Convegno Nazionale "L'ingegneria sismica in Italia", Torino, 20 - 23 settembre 1999.

D.Benedetti, V.Petrini, "On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure", L'Industria delle Costruzioni, vol. 18, pp. 66 - 78, 1984

A.Bernardini, GNDT, "La vulnerabilità degli edifici: valutazione a scala nazionale della vulnerabilità degli edifici ordinari", 2000.

S.Grimaz, F. Meroni, V. Petrini, G. Ranù, R. Tomasoni, G. Zonno, "Expert System for Damage Assessment of buildings in Seismic Areas", Cahiers du Centre Européen de Geodynamique et de Séismologie, Vol. 12, pp.83 - 103, 1996.

S. Grimaz, F. Meroni, V. Petrini, G. Ranù, R. Tomasoni, G. Zonno (1997), "Il ruolo dei dati di danneggiamento del terremoto del Friuli, nello studio di modelli di vulnerabilità sismica degli edifici in muratura", La Scienza e i Terremoti - Analisi e prospettive dall'esperienza del Friuli - 1976/1996, 14 - 16 Novembre 1996, Forum Udine.

F.Pergalani, R.Romeo, L.Luzi, V.Petrini, A.Pugliese, T.Sanò, "Seismic microzoning of the area struck by Umbria - Marche (Central Italy), Ms 5.9 earthquake of 26 September 1997", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, N° 18, pp.279 - 296, 1999.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio tutte le persone che hanno collaborato e contribuito alla realizzazione di questa tesi:

Prof. Cavallin, per l'opportunità che mi ha dato;

Dott. Boscherini, Dott.ssa Felicioni per il materiale cartografico che mi hanno fornito;

Regione Umbria per il materiale aereofotogrammetrico su cui ho lavorato;

Dott. Meroni e Dott.ssa Montaldo per la collaborazione.

Non finirò mai di ringraziare i miei genitori per il sostegno e per avermi dato la possibilità di intraprendere la strada che mi ha portato a concludere questa tesi, la quale spero li ripaghi, almeno in parte, dei loro sacrifici.

Un ringraziamento particolare a Lucia e Mattia, dai quali ho ricevuto un'insperata disponibilità, nonché numerosi insegnamenti che porterò sempre con me.

Infine non posso dimenticare i compagni dei cinque lunghi anni "accademici" (Lorena, Monica, Pamela, Tiziana, Chiara...), con i quali ho condiviso pensieri, ansie e ... appunti! Ancora grazie.